

Untersuchung des Verformungsverhaltens von Asphalt zur Bestimmung von Materialkennwerten für die Dimensionierung

Von der
Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina
zu Braunschweig

zur Erlangung des Grades einer
Doktoringenieurin (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

von
Kerstin Schindler
geboren am 09. September 1976
aus Papenburg

Eingereicht am 31. März 2008

Disputation am 23. Juni 2008

1. Berichterstatter	Prof. Dr.-Ing. Rolf Leutner
2. Berichterstatter	Prof. Dr.-Ing. habil. Frohmuth Wellner
Prüfer	Prof. Dr.-Ing. Harald Budelmann
Prüfungsausschussvorsitzender	Prof. Dr.-Ing. habil. Wolfgang Arand

KURZFASSUNG

In Deutschland werden Straßenbefestigungen nach den Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen (RStO), die auf empirischen Grundlagen basieren, bemessen. Alternativ kann zukünftig ein analytisches Verfahren gemäß den Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaues von Verkehrsflächen mit Asphaltdecke (RDO) angewendet werden. Danach wird aus den mischgutspezifischen Spannungs-Dehnungsverläufen in einer Fahrbahnbefestigung und den verschiedenen Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit einer Straßenbefestigung der Widerstand gegen Ermüdung, Rissbildung und Verformung hinsichtlich des Befestigungsaufbaus optimiert.

Um die Spannungs-Dehnungsverläufe realitätsnah zu beschreiben, wurden in dieser Arbeit für die Stoffmodellierung Materialkennwerte zur Beschreibung des Verformungsverhaltens von Asphalt bestimmt.

Es wurden mit drei unterschiedlichen Prüfverfahren die für die Dimensionierung erforderlichen Eingangswerte an vier verschiedenen Deckschichtvarianten, einer Binder- sowie einer Tragschichtvariante ermittelt.

Asphalt weist ein elastisches, viskoses und plastisches Verformungsverhalten auf, das außerdem noch abhängig von Temperatur, Frequenz und Last ist. Daher wurden im Prüfprogramm diese drei Einflussgrößen systematisch variiert.

Als Kennwerte wurden aus den unter verschiedenen Beanspruchungskombinationen gemessenen Verformungen die absoluten Elastizitätsmoduln, Steifemoduln, Phasenwinkel und Querdehnzahlen sowie Dehnungsraten, Verläufe der Dehnungskurven und Dehnungen nach festgelegten Beanspruchungszeiten für die ausgewählten Asphaltvarianten berechnet, ausgewertet und analysiert.

Die Prüfverfahren unterscheiden sich hinsichtlich der Probekörpergeometrie und der im Probekörper herrschenden Spannungszustände. Die Auswirkungen dieser Randbedingungen auf das Verformungsverhalten und somit auf die Kennwertermittlung wurden untersucht und bestimmt bzw. durch eine Modifizierung der Verformungsmessung eliminiert.

ABSTRACT

In Germany asphalt structures are designed according to catalogued proven constructions (RStO), which are based on empirical principles. Alternatively an analytic procedure can be used soon as given in the guideline for the analytic design of asphalt constructions (RDO). This procedure allows optimizing the resistance against fatigue, cracking and deformation regarding the structure by using the stress-strain processes of different asphalts in a pavement structure and the different requirements of the serviceability of structures.

In order to describe the stress-strain processes realistically, properties for the material modelling were determined in this work to specify the deformation behaviour of asphalt.

Three different deformation test methods were used to determine the input values for the design of structures at four different surface course asphalts, one binder and one base course asphalt.

The deformation behaviour of asphalt is elastic, viscous and plastic, additionally it depends on temperature, loading frequency and applied stress. For this reason, these three influencing factors were systematically varied in the test program.

From the deformations determined under different test combinations, the resilient modulus, the stiffness modulus, the phase angle and the residual strain coefficient as well as the rates of strain, the strain curve and the strain after defined duration of loading were calculated, evaluated and analysed for the selected asphalt variants.

The testing methods differ in the geometry of the test specimen and the stress conditions within the test specimen. The effects of these conditions on the deformation behaviour and on the determination of material properties were analysed and specified or rather eliminated by a modification of the deformation measurement.

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINFÜHRUNG UND PROBLEMSTELLUNG	1
2	BEHANDLUNG DER THEMATIK IN DER LITERATUR.....	4
3	UNTERSUCHUNGSMETHODIK	5
3.1	DIMENSIONIERUNGSRELEVANTE MATERIALEIGENSCHAFTEN UND VERFORMUNGSKENNWERTE	6
3.1.1	Definitionen	6
3.1.1.1	<i>Elastizität</i>	6
3.1.1.2	<i>Viskosität</i>	6
3.1.1.3	<i>Viskoelastizität</i>	6
3.1.1.4	<i>Plastizität</i>	7
3.1.1.5	<i>Dehnungen infolge sinusförmig schwellender Druckbeanspruchung</i>	7
3.1.1.6	<i>Steifemodul</i>	7
3.1.2	Absoluter Elastizitätsmodul	8
3.1.2.1	<i>Experimentelle Bestimmung</i>	8
3.1.2.2	<i>Rechnerische Bestimmung</i>	8
3.1.2.3	<i>Temperatur-Frequenz-Äquivalenz</i>	9
3.1.3	Phasenwinkel	10
3.1.4	Komplexer Elastizitätsmodul	12
3.1.5	Bleibende Dehnung	12
3.2	PRÜFVERFAHREN MIT DYNAMISCHER DRUCKBEANSPRUCHUNG ...	16
3.2.1	Dynamischer Triaxialversuch (Triax)	16
3.2.1.1	<i>Versuchsbeschreibung</i>	16
3.2.1.2	<i>Festlegung der Prüfbedingungen</i>	24
3.2.2	Einaxialer Druckschwellversuch (DSV)	26
3.2.2.1	<i>Versuchsbeschreibung</i>	26
3.2.2.2	<i>Festlegung der Prüfbedingungen</i>	29
3.2.3	Dynamischer Stempleindringversuch (DSEV)	31
3.2.3.1	<i>Versuchsbeschreibung</i>	31
3.2.3.2	<i>Festlegung der Prüfbedingungen</i>	32
3.2.4	Spurbildungsversuch	34
3.2.4.1	<i>Versuchsbeschreibung</i>	34
3.2.4.2	<i>Festlegung der Prüfbedingungen</i>	34
3.3	UNTERSUCHTE ASPHALTVARIANTEN	35
3.3.1	Herkunft/ Zusammensetzung	35
3.3.2	Ergebnisse der Kontrollprüfungen	35
3.3.3	Probekörperherstellung	36

4	UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE	38
4.1	VERFORMUNGSVERHALTEN VON ASPHALT BEI HOHEN TEMPERATUREN	38
4.2	VORUNTERSUCHUNGEN	38
4.2.1	Reibung zwischen Laststempel und Probekörperendfläche.....	39
4.2.2	Einfluss des h/d-Verhältnisses auf den Verformungswiderstand.....	41
4.2.3	Herstellung von schlanken Asphaltprobekörpern	43
4.2.3.1	<i>Einfluss der Bohrrichtung auf den Verformungswiderstand</i>	44
4.2.3.2	<i>Optimierung der Plattenherstellung</i>	46
4.2.4	Messsystem am Probekörper.....	49
4.3	ELASTISCHE UND VISKOELASTISCHE VERFORMUNGEN	55
4.3.1	Absolute Elastizitätsmoduln nach Francken und Verstraeten	55
4.3.2	Einaxialer Druckschwellversuch - elastische und viskoelastische Kennwerte	59
4.3.2.1	<i>Absoluter Elastizitätsmodul - DSV</i>	59
4.3.2.2	<i>Phasenwinkel - DSV</i>	62
4.3.3	Dynamischer Triaxialversuch - elastische und viskoelastische Kennwerte	68
4.3.3.1	<i>Räumlicher Spannungszustand.....</i>	68
4.3.3.2	<i>Absoluter Elastizitätsmodul - Triax</i>	71
4.3.3.3	<i>Querdehnzahl</i>	76
4.3.3.4	<i>Phasenwinkel - Triax</i>	81
4.3.4	Dynamischer Stempелеindringversuch - elastische und viskoelastische Kennwerte	84
4.3.4.1	<i>Steifemodul</i>	84
4.3.4.2	<i>Phasenwinkel - DSEV</i>	88
4.3.5	Aufteilung der Verformung in elastische und viskoelastische Anteile	91
4.3.5.1	<i>Lösungsansatz – komplexer Elastizitätsmodul</i>	91
4.3.5.2	<i>Lösungsansatz – Hystereseschleifen</i>	92
4.3.5.3	<i>Lösungsansatz – analytisch</i>	96
4.3.5.4	<i>Lösungsansatz – iterativ</i>	101
4.4	BLEIBENDE VERFORMUNGEN	105
4.4.1	Einaxialer Druckschwellversuch - bleibende Verformung	106
4.4.2	Dynamischer Triaxialversuch - bleibende Verformung	109
4.4.3	Dynamischer Stempелеindringversuch - bleibende Verformung.....	114
4.4.4	Spurbildungsversuch - bleibende Verformung	117
4.4.5	Approximation der Dehnungsverläufe	118
4.4.5.1	<i>Approximation der Dehnungsverläufe ermittelt mit dem einaxialen Druckschwellversuch.....</i>	119

4.4.5.2	<i>Approximation der Dehnungsverläufe ermittelt mit dem dynamischen Triaxialversuch</i>	120
4.4.5.3	<i>Approximation der Dehnungsverläufe ermittelt mit dem dynamischen Stempeleindringversuch</i>	122
4.4.5.4	<i>Abhängigkeiten der ermittelten Faktoren und Exponenten der Approximationsgleichungen von den Beanspruchungsgrößen</i>	124
5	INTERPRETATION DER UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE	130
5.1	ELASTISCHE UND VISKOELASTISCHE VERFORMUNGEN – VERGLEICH DER PRÜFVERFAHREN	130
5.2	BLEIBENDE VERFORMUNGEN – VERGLEICH DER PRÜFVERFAHREN	134
6	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....	136
Literatur		
	Regelwerke	140
	Literatur	140
	Software	143
	Abkürzungen und Formelzeichen	144
	Abbildungsverzeichnis	147
	Tabellenverzeichnis	153
	Anhang	154

1 EINFÜHRUNG UND PROBLEMSTELLUNG

Der Straßenbau muss sich immer neuen Herausforderungen stellen wie der erhöhten Verkehrsbeanspruchung durch Vergrößerung der Achslasten und neuen Fahrzeugtypen (Gigaliner) bzw. neuen Kombinationen aus bereits bestehenden Transportfahrzeugen. Die Folge dieser Herausforderungen ist für unsere Straßen ein steigender Substanzverlust durch die Zunahme von Rissen, Schlaglöchern und Spurrinnen.

Mit Blick auf die knapper werdenden öffentlichen Finanzmittel und den fortschreitenden Substanzverlust der Straßen werden neue Lösungswege gesucht, diesem Kreislauf zu entkommen. In den neuen Vertragsformen, u. a. dem Funktionsbauvertrag, sind die Auftragnehmer neben dem Neubau, dem Ausbau oder der Grunderneuerung einer Straße auch für die Erhaltung des entsprechenden Streckenabschnitts für einen Zeitraum von 15-30 Jahren unter Berücksichtigung funktionaler Anforderungen verantwortlich. Mit dem Modell des Funktionsbauvertrages verfolgt die öffentliche Hand das Ziel, durch das Zusammenführen der Projektphasen Bau und Erhaltung die nachhaltige Qualität der neu gebauten Straßen zu steigern, da es eine Gewährleistung mit kurzen Fristen in der bestehenden Form bei Funktionsbauverträgen nicht gibt.

Weiter werden mit dieser Art des Bauvertrages durch die Berücksichtigung von Nebenangeboten für die Straßenbefestigung Innovationen gefördert. Das Interesse eines Betreibers ist demnach groß, für ein konkretes Projekt eine im Vergleich zur Standardlösung gemäß den in Deutschland geltenden Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen RStO gleichwertige Lösung mit möglichst wenig Instandhaltungsmaßnahmen während der gesamten Vertragslaufzeit zu ermitteln. Um die Gleichwertigkeit nachzuweisen, bedarf es Dimensionierungsverfahren, welche nicht auf empirischen sondern auf analytischen Ansätzen basieren.

In Deutschland existieren für die analytische Lösung mehrere Ansätze. Bisher wurde nur für einen Ansatz ein bis zur Anwendung ausgereiftes Verfahren auf Basis der Mehrschichtentheorie entwickelt, welches die Komplexität einer Asphaltbefestigung analytisch widerspiegelt.

Für ein Dimensionierungsverfahren werden Eingangsparameter für die Stoffgesetze bezüglich der Materialkennwerte der einzusetzenden Baustoffe, der Tragfähigkeit der Unterlage, der Wetterbedingungen sowie der Verkehrsbelastung benötigt und mit Hilfe der Finite-Elementen-Methode bzw. der Mehrschichtentheorie umgesetzt.

Mit den o. g. Verfahren kann aus den für den eingesetzten Baustoff ermittelten Spannungs- und Dehnungsverläufen in einer Fahrbahnbefestigung und den verschiedenen Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit einer Straßenbefestigung der Widerstand gegen Ermüdung, Rissbildung und Verformung hinsichtlich des Befestigungsaufbaus optimiert und die Gleichwertigkeit zur RStO nachgewiesen werden.

Mit diesem Verfahren wird planenden Ingenieuren die Möglichkeit gegeben, wirtschaftlich vertretbare Entscheidungen auf der Grundlage mathematischer Betrachtungen und der Erfahrungen der RStO treffen zu können. Außerdem kann bei diesen Verfahren mit der Eingabe der Materialkennwerte auf die unterschiedlichen regional vorhandenen Baumaterialien eingegangen werden, die nach der Tafel 1 der RStO als gleichwertig angesehen werden.

Die Genauigkeit dieser neuen Art der Dimensionierung hängt zum großen Teil von der präzisen Bestimmung der Materialkennwerte ab. Das Tieftemperaturverhalten, das Ermüdungsverhalten und das Verformungsverhalten können mit Hilfe von verschiedenen Laborprüfverfahren bestimmt werden. Die im Labor durchgeführten Versuche zur Ermittlung der Verhaltensweise von Asphalt dienen der Prüfung der Eignung eines bestimmten Mischgutes oder der Einordnung verschiedener Asphalte beispielsweise nach deren Verformungswiderstand. Diese Prüfungen sind gemäß den Vorgaben der entsprechenden technischen Regelwerke durchzuführen.

Da der Baustoff Asphalt temperatur-, frequenz- und spannungsabhängig reagiert, sind für ein analytisches Dimensionierungsverfahren mathematische Verhaltensfunktionen für die Temperatur-, Frequenz- und Spannungsempfindlichkeit notwendig, die an praxisadäquat verdichteten Probekörpern mit Laborprüfverfahren und variablen Beanspruchungskombinationen bestimmt werden.

Ziel dieser Arbeit ist es, die Verhaltensfunktionen von Asphalten hinsichtlich des Verformungsverhaltens unter Druckbeanspruchung bei hohen Temperaturen zu ermitteln. Mit dieser Grundlage für analytische Dimensionierungsverfahren ist es möglich, das Verformungsverhalten von Asphalt präzise prognostizieren zu können und damit bereits in der Planungsphase der Gefahr der Spurrinnenbildung entgegenzuwirken.

Als Laborprüfverfahren werden für diese Arbeit folgende Versuche ausgewählt:

- einaxialer Druckschwellversuch,
- dynamischer Triaxialversuch,
- dynamischer Stempeleindringversuch,
- Spurbildungsversuch

Da diese Prüfverfahren sich hinsichtlich der Probekörpergeometrie und der im Probekörper herrschenden Spannungszustände voneinander unterscheiden, ist zunächst die Eignung der einzelnen Prüfverfahren zur Bestimmung von dimensionierungsrelevanten Materialkennwerten zu prüfen. Weiter sind die Auswirkungen der in den verschiedenen Prüfverfahren wirkenden Randbedingungen auf die ermittelten Prüfergebnisse zu erfassen.

Um eine umfangreiche Datengrundlage für die Stoffmodellierung zu erstellen, werden die Prüfverfahren mit vier verschiedenen Asphaltdeckschichtvarianten, einer Asphaltbindervariante sowie einer Asphalttragschichtvariante durchgeführt.

Hauptziel dieser Arbeit ist es nicht, das Mischgut hinsichtlich des Verformungsverhaltens nach Technischen Prüfvorschriften oder Vorgaben aus der DIN EN zu beurteilen, sondern vielmehr Verhaltensfunktionen des Asphalts zu ermitteln. Dies wird im Rahmen der Arbeit durch eine systematische Variation der Beanspruchungsgrößen Temperatur, Frequenz und Last erfolgen. Dadurch lassen sich die Einflüsse der variierten Beanspruchungsgrößen auf die Materialkennwerte quantifizieren und mathematisch beschreiben.

2 BEHANDLUNG DER THEMATIK IN DER LITERATUR

Die Thematik Prognose und Bestimmung des Verformungsverhaltens von Asphalt wurde in vielen Forschungsberichten behandelt. Untersuchungen, bei denen experimentell bestimmte Kenngrößen wie z.B. die Dehnungsrate mit den in situ gemessenen Verformungen unter Berücksichtigung der verschiedenen Einflussgrößen (z.B. Temperatur, Verkehrsbelastung) normiert wurden, um Prognosen hinsichtlich der Entstehung von Spurrinnen zu ermöglichen, wurden von [Arand, v. d. Decken 1996] und [Karcher 2005] durchgeführt. Diese Verfahren haben den Vorteil, dass mit einem entsprechenden Bewertungshintergrund auf Basis von im Versuch und in situ gemessenen Verformungen qualitative Aussagen getroffen werden können, die im Rahmen einer Eignungsprüfung ausreichen.

Um allerdings eine quantitative Einschätzung der Verformung unter Einbeziehung aller Schichten einer Asphaltbefestigung und nicht nur der Deckschicht zu realisieren, reichen diese Verfahren und die Prüfgeräteausrüstung im Labor zur Simulation der tatsächlichen Belastungsbedingungen auf und in einer Straßenbefestigung nicht mehr aus. Lösungsmöglichkeiten bieten Berechnungsverfahren wie die Mehrschichtentheorie oder die Finite-Elemente-Methode, die die Verknüpfungen der tatsächlich vorhandenen Randbedingungen (Wetter, Verkehr, Aufbau der Befestigung) realisieren können. Die dafür notwendigen Eingangsparameter (Elastizitätsmodul, Phasenwinkel,...) der verschiedenen eingesetzten Baustoffe fließen über Stoffmodelle in die Berechnung mit ein. Dabei ist die Kenntnis des Verhaltens von Asphalt bei unterschiedlichen Temperatur- und Spannungszuständen für eine genaue Berechnung notwendig. In einigen Forschungsvorhaben wurden Materialparameter unter verschiedenen Beanspruchungskombinationen bereits bestimmt. Allerdings war bei diesen Forschungsvorhaben das primäre Ziel die Optimierung von Prüfmodalitäten bestimmter Prüfverfahren, wobei verschiedene Mischgutarten mit unterschiedlichen Beanspruchungskombinationen beansprucht wurden und die Ergebnisse nur hinsichtlich des plausiblen Rankings der untersuchten Mischgutarten als Entscheidungskriterium für die Optimierung verwendet wurden [Hiersche 1992; Arand, v. d. Decken 1996; Leutner 2003; Renken 2005]. Detaillierte Untersuchungen, in denen beispielsweise die Einflüsse der Prüftemperatur, der Belastungsgeschwindigkeit und der Prüfspannung systematisch an verschiedenen Mischgutarten erforscht wurden, um Verhaltensfunktionen für eine analytische Dimensionierung aufzustellen, wurden bisher nicht veröffentlicht.

Die Kenntnisse aus den Forschungsvorhaben, in denen die Einflüsse der Asphaltzusammensetzung (Variation des Bindemittelgehaltes, Granulatzugabe,...) auf das Verformungsverhalten untersucht wurden, sind für die Erweiterung der zu ermittelnden Verhaltensfunktionen und damit der Optimierung der Genauigkeit eines analytischen Dimensionierungsverfahren von großem Wert.

3 UNTERSUCHUNGSMETHODIK

Um dimensionierungsrelevante Verformungskennwerte zu ermitteln, müssen die Versuchsbedingungen im Labor die Verhältnisse auf der Straße möglichst realitätsnah widerspiegeln. Jedes Volumenelement in einer Asphaltbefestigung ist bei Belastung einem dreidimensionalen Spannungszustand ausgesetzt. In vertikaler Richtung wirken die Druckspannungen infolge der Fahrzeugüberfahrten, die in den Reifenaufstandsflächen über den Reifenkontakt auf die Asphaltbefestigung übertragen werden. In horizontaler Richtung behindert das umgebende Material die Querdehnung des belasteten Materials, so dass sich unter vertikalen Beanspruchungen auch horizontale Spannungen in der Asphaltbefestigung einstellen.

Dieser räumliche Spannungszustand kann beim dynamischen Triaxialversuch mit gezielt erzeugten Vertikal- und Horizontalspannungen simuliert werden. Da dieser Versuchstyp sehr komplex ist und die dafür notwendigen Geräte nur in wenigen Laboratorien zur Verfügung stehen, ist es sinnvoll, weitere Prüfverfahren, bei denen der Probekörper einer dynamischen Druckbeanspruchung ausgesetzt wird, in die Untersuchungen mit einzubeziehen. Zu diesen Verfahren zählen der einaxiale Druckschwellversuch, der dynamische Stempeleindringversuch sowie der Spurbildungsversuch. Die bei den verschiedenen Prüfverfahren jeweils herrschenden Spannungszustände sind bei der Auswertung der Ergebnisse zu berücksichtigen.

Um das Stoffverhalten des Baustoffes Asphalt im Druckbereich zutreffend beschreiben zu können, ist eine systematische Variation der Beanspruchungsgrößen notwendig. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Einfluss verschiedener Lasten, Belastungsgeschwindigkeiten sowie Prüftemperaturen auf das Verformungsverhalten untersucht. Die für die verschiedenen Prüfverfahren angesetzten Beanspruchungsgrößen werden realitätsnah angenommen bzw. berechnet. Sie sind in den jeweiligen Versuchsbeschreibungen angegeben.

Da bei einem analytischen Dimensionierungsverfahren für alle Schichten einer Asphaltbefestigung Materialparameter benötigt werden, wurde das Verformungsverhalten an vier Asphaltdeckschichtvarianten (Asphaltbeton AB 0/11S, Splittmastixasphalt SMA 0/11S aus Norddeutschland, Splittmastixasphalt SMA 0/11S aus Süddeutschland und offenerporiger Asphalt 0/8), einem Asphaltbinder ABi 0/16S sowie einer Asphalttragschicht ATS 0/32CS bestimmt und analysiert.

3.1 DIMENSIONIERUNGSRELEVANTE MATERIALEIGENSCHAFTEN UND VERFORMUNGSKENNWERTE

Die Bestimmung dimensionierungsrelevanter Materialeigenschaften und Verformungskennwerte für den Baustoff Asphalt ist sehr komplex, da diese sowohl elastische als auch viskose und plastische Verformungseigenschaften des Baustoffes widerspiegeln müssen. Die Analyse gemessener Verformungskurven ermittelt unter dynamischer Beanspruchung ermöglicht die Bestimmung dieser Größen.

3.1.1 Definitionen

3.1.1.1 *Elastizität*

Unter dem Begriff Elastizität wird die Fähigkeit eines Körpers verstanden, sich beim Aufbringen einer äußeren aufgezwungenen Last sofort zu verformen und sich nach Wegnahme dieser vollständig und spontan zurückzuverformen [DIN 1342-1]. In der Rheologie werden Federelemente zur Beschreibung dieser Größe verwendet.

3.1.1.2 *Viskosität*

Die Viskosität beschreibt die Eigenschaft eines Stoffes durch äußere Kräfte mit der Zeit zunehmende Gestalt- und/oder Volumenänderungen zu erfahren, die nach Wegfall der Ursachen erhalten bleiben [DIN 1342-1]. Als rheologische Größe werden für die Viskosität Dämpferelemente eingesetzt.

3.1.1.3 *Viskoelastizität*

Das Verhalten eines elastischen Festkörpers mit viskosen Eigenschaften ist als Viskoelastizität definiert [DIN 1342-1]. Durch die Parallelschaltung von Feder- und

Dämpferelement (Voigt-Kelvin-Modell) wird diese Stoffeigenschaft rheologisch beschrieben.

3.1.1.4 Plastizität

Mit der Plastizität wird die Eigenschaft eines Körpers beschrieben sich durch äußere Kräfte oberhalb einer Fließgrenze sprungartig zu verformen, wobei nach Wegfall der Kräfte die Dehnungen erhalten bleiben [DIN 1342-1]. Die Plastizität kann mit Hilfe eines St.-Venant'schen Reibelementes simuliert werden.

3.1.1.5 Dehnungen infolge sinusförmig schwellender Druckbeanspruchung

Wird der Baustoff Asphalt einer sinusförmig schwellenden Druckbeanspruchung ausgesetzt, treten die in den Kapiteln 3.1.1.1 bis 3.1.1.4 aufgeführten Stoffeigenschaften auf. Durch jeden Lastimpuls werden viskose Dehnungen hervorgerufen, deren Addition eine Impulskriechkurve ergibt. Plastische Verformungsanteile sind ebenfalls Bestandteil der Impulskriechkurve, da am Anfang des Versuchs sich spontane Dehnungen infolge der Nachverdichtung einstellen. Da die Rückverformungen nach Wegnahme der letzten Belastung in der Regel nicht messtechnisch erfasst werden, sind auch viskoelastische Dehnungsanteile in der Impulskriechkurve enthalten. Die verschiedenen Dehnungsanteile werden in der folgenden Auswertung zusammengefasst als bleibende Dehnung bezeichnet.

Die bleibenden Dehnungen werden aufgrund der sinusförmig schwellenden Druckbeanspruchung von einer schwingenden Dehnungsreaktion überlagert, die sich aus elastischen und viskoelastischen Dehnungsanteilen zusammensetzt. Trotz des Auftretens viskoelastischer Dehnungsanteile wird diese Reaktion in der folgenden Arbeit vereinfachend als elastische Dehnung definiert.

3.1.1.6 Steifemodul

Der Steifemodul E_S beschreibt das Spannungs-Verformungs-Verhalten von Materialien bei behinderter Seitendehnung.

3.1.2 Absoluter Elastizitätsmodul

3.1.2.1 Experimentelle Bestimmung

Zur Beschreibung der elastischen Eigenschaften von Asphalt wird der absolute Elastizitätsmodul $|E|$ verwendet. Bei einer zeitabhängigen Belastung eines Probekörpers wie beispielsweise einem sinusförmigen Spannungsverlauf berechnet sich der Kennwert aus dem Quotienten der aufgetragenen Spannungsamplitude und der resultierenden Dehnungsamplitude [FGSV 2006].

$$|E| = \frac{\hat{\sigma}}{\hat{\varepsilon}} \quad [\text{MPa}] \quad \text{Gleichung 3-1}$$

mit $\hat{\sigma}$ = Spannungsamplitude; $\hat{\varepsilon}$ = Dehnungsamplitude

3.1.2.2 Rechnerische Bestimmung

Da der Baustoff Asphalt aber nicht nur spannungsabhängig sondern auch temperaturabhängig reagiert, wurden Berechnungsverfahren entwickelt, um dieses komplexe Verhalten zu beschreiben [FGSV 2006]. 1974 entwickelten Francken und Verstraeten ein Verfahren zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls von Asphalt aus konventionellen Mischgut- und Bindemitteldaten auf der Grundlage von Ergebnissen dynamischer Biegeversuche an Probekörpern, die aus Asphalten mit unterschiedlichen Bitumensorten hergestellt wurden [Francken 1974]. Danach gilt:

$$|E| = R \cdot E_{\infty} \quad 0 < R \leq 1 \quad \text{Gleichung 3-2}$$

mit R = Reduktionsfaktor [-]

E_{∞} = Glasmodul [MPa]

Für die Ermittlung des Reduktionsfaktors R stellte Hürtgen Nomogramme auf, die im Gegensatz zu den hochkomplexen Gleichungen von Francken und Verstraeten die Bestimmung vereinfachen [Hürtgen 1982]. Der Reduktionsfaktor kann danach für drei Frequenzen (5, 10 und 20 Hz) im Temperaturbereich von -20 °C bis 40 °C mit der Nadelpenetration des verwendeten Bindemittels ermittelt werden. Voraussetzung ist allerdings, dass die thermische Empfindlichkeit des Bindemittels berechnet mit dem Penetrationsindex I_p den Wert 0 besitzt.

Der Glasmodul E_{∞} beschreibt das Materialverhalten bei sehr hohen Frequenzen und tiefen Temperaturen. Berechnen lässt sich dieser Wert mit den Volumenanteilen von Hohlraum, Bindemittel und Gestein im Mischgut nach folgender Formel:

$$E_{\infty} = 1,436 \cdot 10^4 \cdot \left(\frac{V_g}{V_b} \right)^{0,55} \cdot e^{-0,0584 \cdot V_a} \quad \text{Gleichung 3-3}$$

Die Volumenanteile V_a , V_b und V_g lassen sich wie folgt ermitteln:

$$\text{Hohlraumvolumen} \quad V_a = \left(1 - \frac{\rho_A}{\rho_{R,bit}} \right) \cdot 100 \quad [\text{Vol.-%}] \quad \text{Gleichung 3-4}$$

$$\text{Bindemittelvolumen} \quad V_b = \left(\frac{\rho_A}{\rho_B} \right) \cdot B \quad [\text{Vol.-%}] \quad \text{Gleichung 3-5}$$

$$\text{Gesteinsvolumen} \quad V_g = \left(\frac{\rho_A \cdot (100 - B)}{\rho_{R,M}} \right) \quad [\text{Vol.-%}] \quad \text{Gleichung 3-6}$$

mit

ρ_A = Raumdichte des Asphaltmischguts [g/cm^3]

$\rho_{R,bit}$ = Rohdichte des Mischguts [g/cm^3]

ρ_B = Dichte des Bitumens [g/cm^3]

B = Bindemittelgehalt [M.-%]

$\rho_{R,M}$ = Rohdichte des Gesteins [g/cm^3]

3.1.2.3 Temperatur-Frequenz-Äquivalenz

Die Temperatur-Frequenz-Äquivalenz für den absoluten Elastizitätsmodul kann nach Hürtgen bestimmt werden [Hürtgen 2000]. Es zeigt sich, dass der gleiche absolute Elastizitätsmodul bei unterschiedlichen Prüftemperaturen und Frequenzen ermittelt werden kann. Wird z.B. bei einer Temperatur von 35 °C und einer Frequenz von 50 Hz geprüft, ergibt sich - für einen bestimmten Modellasphalt - der gleiche Wert für den absoluten Elastizitätsmodul wie bei einer Beanspruchungskombination von 25 °C und 8 Hz, siehe Abbildung 3-1.

Durch die horizontale Verschiebung der absoluten Elastizitätsmoduln bilden die bei verschiedenen Temperaturen ermittelten absoluten Elastizitätsmoduln eine Master-

kurve bei einer bestimmten Temperatur T_R , die im dargestellten Beispiel 15 °C beträgt.

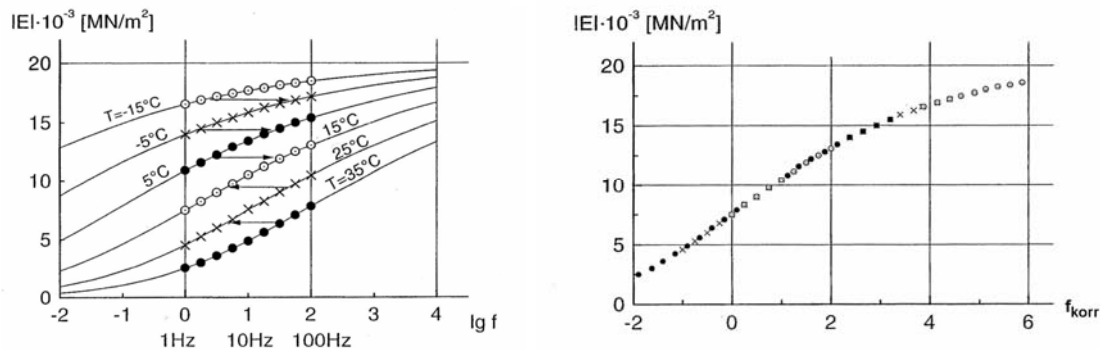


Abb. 3-1: Ermittlung einer Masterkurve [Hürtgen 2000]

Die Verschiebung der Messwerte erfolgt durch die Multiplikation der jeweiligen Prüffrequenz mit einem Verschiebungsfaktor α_T , der nach Hürtgen mit der physikalisch begründeten Arrhenius-Funktion ermittelt werden kann. Dieser Wert spiegelt die korrigierte Frequenz f_{korr} wider, über die der ermittelte absolute Elastizitätsmodul aufgetragen wird.

$$f_{\text{korr}} = f \cdot \alpha_T \quad \text{Gleichung 3-7}$$

$$\alpha_T = \frac{1}{e^{-m \left(\frac{1}{T+273} - \frac{1}{T_R+273} \right)}} \quad \text{Gleichung 3-8}$$

mit: T tatsächliche Prüftemperatur $[\text{°C}]$
 T_R Bezugstemperatur $[\text{°C}]$
 m Faktor ($m \approx 25.000$ [Hürtgen 2000]) $[\text{°C}]$

Ein Vergleich der absoluten Elastizitätsmoduln, die zum einen mit den verschiedenen Prüfverfahren bei unterschiedlichen Prüfbedingungen ermittelt und zum anderen nach diesem Verfahren berechnet wurden, erfolgt in Kapitel 5.

3.1.3 Phasenwinkel

Aufgrund der viskosen Eigenschaft des Bitumens reagiert der Asphalt auf Beanspruchungen mit einer phasenverschobenen Dehnung. Der Phasenwinkel ϕ wird messtechnisch als zeitliche Differenz zwischen dem Maximum bzw. Minimum des Span-

nungsverlaufs und dem Maximum bzw. Minimum des Dehnungsverlaufs erfasst, siehe Abbildung 3-2.

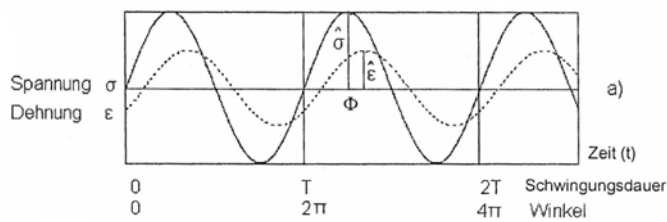


Abb. 3-2: Phasenverschiebung [FGSV 2006]

Mit steigender Temperatur treten die viskosen Eigenschaften von Bitumen zunehmend in den Vordergrund. Bei hohen Temperaturen werden dementsprechend große und bei niedrigen Temperaturen kleine Phasenwinkel gemessen. Der Phasenwinkel wird zusätzlich von der Belastungsfrequenz beeinflusst. Je kleiner die Lasteinwirkungszeit bzw. die für den Fließvorgang verfügbare Zeit ist, desto geringer wird der viskose Einfluss und umso kleiner wird der Wert dieser Kenngröße. Die Phasenwinkel können Werte in dem Bereich zwischen $0^\circ < \Phi < 90^\circ$ annehmen.

Mit dem Dynamischen Scher-Rheometer (DSR) lassen sich der Phasenwinkel und der Schubmodul von Bitumen bestimmen. Bei dem Prüfverfahren wird eine Bitumenprobe kraftschlüssig zwischen einer starren und einer beweglichen Platte aufgebracht und oszillierend durch Rotation auf Scherung beansprucht [Hagner 2003]. Werden die Ergebnisse über die Frequenz aufgetragen, ergeben sich entgegengesetzte Verläufe. Der Phasenwinkel fällt und der Schubmodul steigt mit zunehmender Frequenz.

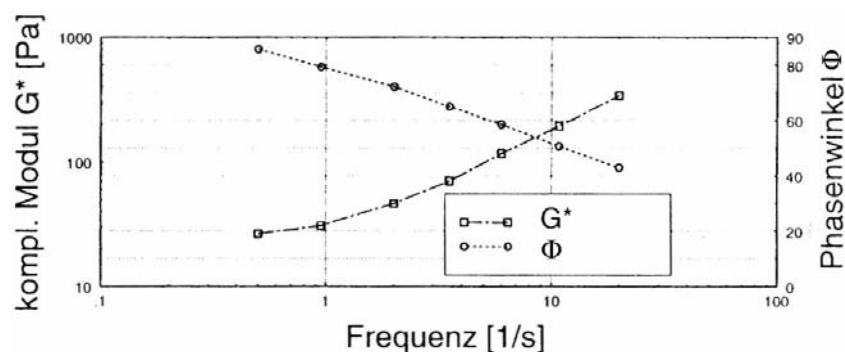


Abb. 3-3: Ergebnisse eines DSR-Versuches mit programmiert gesteigerter Frequenz [Hagner 2003]

3.1.4 Komplexer Elastizitätsmodul

Mit Kenntnis des absoluten Elastizitätsmoduls $|E|$ und des Phasenwinkels ϕ lässt sich der komplexe Elastizitätsmodul E^* darstellen, der mit seinem Betrag dem absoluten Elastizitätsmodul entspricht. Dieser Wert ermöglicht mit Hilfe rheologischer Zusammenhänge die Aufspaltung in einen Realteil (elastischer Anteil) und einen Imaginärteil (viskoser Anteil), siehe Abbildung 3-4.

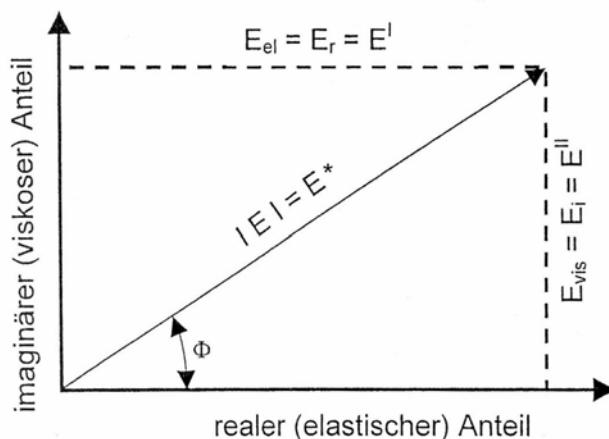


Abb. 3-4: Schematische Darstellung der Aufteilung des komplexen Elastizitätsmoduls in einen realen und einen imaginären Anteil [FGSV 2006]

Mit den folgenden Gleichungen lassen sich diese Anteile berechnen:

Realer (elastischer) Anteil	$E_{el} = E_r = E' = \frac{\sigma}{\varepsilon} \cdot \cos\phi$	Gleichung 3-9
-----------------------------	-----------------------------------------------------------------	---------------

Imaginärer (viskoser) Anteil	$E_{vis} = E_i = E'' = \frac{\sigma}{\varepsilon} \cdot \sin\phi$	Gleichung 3-10
------------------------------	-------------------------------------------------------------------	----------------

Für die Aufstellung dieser Theorie wurden die Ergebnisse aus Versuchen mit wechselnder Zug-Druck-Beanspruchung - im Folgenden als Wechselversuche bezeichnet - verwendet.

3.1.5 Bleibende Dehnung

Als Kennwert für den Verformungswiderstand wird die bleibende Dehnung nach einer bestimmten Anzahl von Lastwechseln (beim dynamischen Stempelleindringversuch

nach 10.000 Lastwechseln, beim Triaxialversuch (DIN EN 12697-25) nach 1.000 Lastwechseln) oder an einem markanten Punkt der Impulskriechkurve der bleibenden Dehnung (Wendepunkt beim Druckschwellversuch) verwendet.

Eine weitere charakteristische Größe für die bleibende Dehnung ist die Dehnungsrate z. B. die Steigung der Impulskriechkurve am Versuchsende oder an einem definierten Punkt (Wendepunkt beim einaxialen Druckschwellversuch).

Zur rechnerischen Bestimmung dieser Größen werden die gemessenen Impulskriechkurven mit Hilfe der Methode der kleinsten Quadrate und verschiedenen Gleichungen approximiert:

- für die Triaxialversuche nach DIN EN 12697-25, Teil B

$$\varepsilon(n) = a \cdot n^b \quad \text{Gleichung 3-11}$$

mit $\varepsilon(n)$ = bleibende axiale Dehnung nach n Lastwechseln [‰]

a = Anpassungskoeffizient [-]

b = Anpassungsexponent [-]

- für die einaxialen Druckschwellversuche nach TP A-StB [FGSV 1999]

$$\varepsilon(n) = \varepsilon_0 + a \cdot n^k + b \cdot (e^{c \cdot n} - 1) \quad \text{Gleichung 3-12}$$

mit $\varepsilon(n)$ = bleibende axiale Dehnung nach n Lastwechseln [‰]

a, b = Anpassungskoeffizient [-]

k, c = Anpassungsexponent [-]

- für die dynamischen Stempleindringversuche nach dem Entwurf der TP A-StB [FGSV 2003]

$$\varepsilon(n) = a \cdot n^b \quad \text{Gleichung 3-13}$$

mit $\varepsilon(n)$ = Eindringtiefe nach n Lastwechseln [‰]

a = Anpassungskoeffizienten [-]

b = Anpassungsexponenten [-]

Um das Verformungsverhalten von Asphalt genauer beschreiben zu können und dadurch die Berechnung der Spurrinnenbildung zu optimieren, ist nicht nur die punktuelle bleibende Dehnung, sondern der Verlauf der Impulskriechkurve auszuwerten.

Die ersten beiden Phasen der Impulskriechkurve (Konsolidierung und volumenkonstante Verformung) stellen für die Auswertung den entscheidenden Bereich dar, siehe Abbildung 3-5. In der dritten Phase kommt es zu einer beginnenden und fortschreitenden volumendilatanten Gefügezerstörung des Probekörpers, deren Einflüsse eine Bestimmung des Materialverhaltens im Gebrauchszustand nicht zulassen und daher nicht näher betrachtet werden.

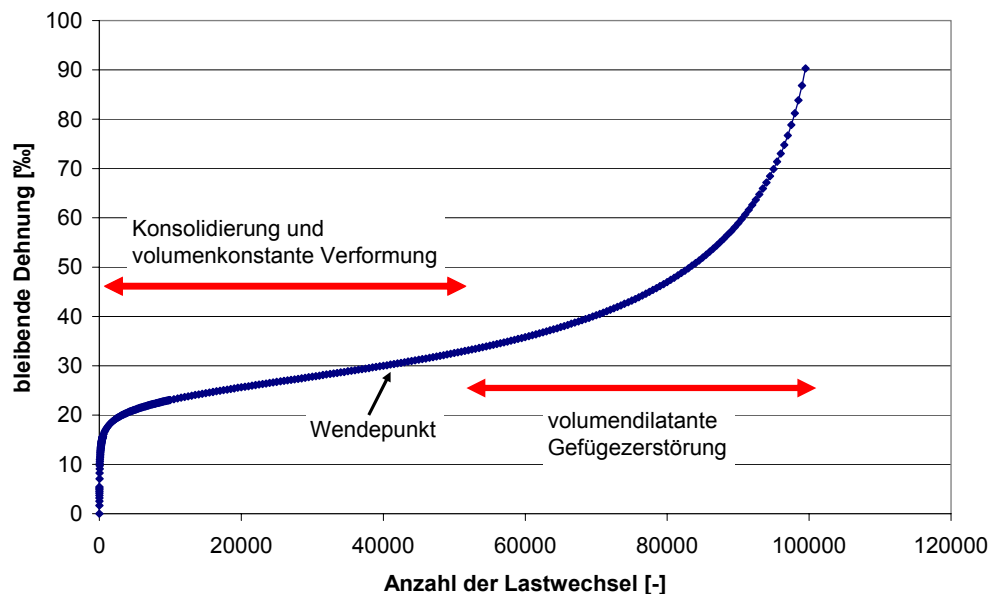


Abb. 3-5: Impulskriechkurve, ermittelt mit dem einaxialen Druckschwellversuch

Aus dem Verlauf der ersten beiden Phasen der Dehnungskurven können Parameter für rheologische Modelle (z.B. Burgers oder Huet-Sayeh) abgeleitet werden.

Werden diese Parameter an Dehnungskurven bestimmt, die bei unterschiedlichen Beanspruchungszuständen (Temperatur, Frequenz, Spannung) ermittelt wurden, können Abhängigkeiten der Parameter von den variierten Beanspruchungsgrößen bestimmt werden. Diese Kenntnisse ermöglichen es, Dehnungsverläufe innerhalb geprüfter und damit abgesicherter Bereiche zu prognostizieren und den Versuchsumfang zu minimieren. Die einfachen rheologischen Modelle (z.B. Burgers-Modell) spiegeln den Dehnungsverlauf nicht zufrieden stellend wider. Aus diesem Grunde sind komplexere Modelle (z.B. Modell von Huet-Sayeh) zu verwenden, deren Berechnungen allerdings sehr aufwendig sind.

Da die Approximationsgleichungen den Verlauf der Dehnungskurven mit einem hohen Bestimmtheitsmaß widerspiegeln und der Aufwand der Berechnung im Vergleich zu denen mit den komplexen rheologischen Modellen als gering einzustufen ist, wird im Rahmen dieser Arbeit untersucht, ob Abhängigkeiten zwischen den Beanspruchungsgrößen und den Koeffizienten und Exponenten der Approximationsgleichungen bestehen. Dazu wurde eine Vielzahl von Dehnungsverläufen bei unterschiedlichen Beanspruchungszuständen ermittelt.

Eine weitere, aber auch sehr komplexe Methode zur Findung von Abhängigkeiten zwischen den Dehnungskurven und den Prüfgrößen, soll der Vollständigkeit halber an dieser Stelle erwähnt werden. Mit Hilfe von Neuronalen Netzen ist es möglich Informationen über Dehnungsverlauf, Prüftemperatur, Frequenz, Spannung, etc. so miteinander zu verknüpfen und zu gewichten, dass eine entsprechende Prognose von Dehnungsverläufen bei unterschiedlichen Beanspruchungszuständen möglich ist [Wellner, Leutner 2007].

3.2 PRÜFVERFAHREN MIT DYNAMISCHER DRUCKBEANSPRUCHUNG

3.2.1 Dynamischer Triaxialversuch (Triax)

3.2.1.1 Versuchsbeschreibung

In der DIN EN 12697-25 (2005) Teil B ist ein Verfahren zur Bestimmung der Beständigkeit von Asphalt gegenüber bleibenden Verformungen mit Hilfe von Druckschwellversuchen mit behinderter Querdehnung beschrieben. Dieses Verfahren wird zur Einordnung verschiedener Asphalte nach deren Verformungswiderstand bzw. zur Eignungsprüfung angewendet. Dabei wird ein zylindrischer Asphaltprobekörper einem triaxialen Spannungszustand ausgesetzt, der durch das Aufbringen eines zyklischen Axialdrucks und eines statischen oder dynamisch Radialdrucks zur Behinderung der Querdehnung erzeugt wird. Der zyklische Axialdruck kann entweder haversine-impulsförmig oder blockimpulsförmig aufgebracht werden.

Das Ergebnis dieses Prüfverfahrens ist die Impulskriechkurve der bleibenden axialen Dehnung des Probekörpers, deren Verlauf mit der Gleichung 3-11 approximiert wird:

$$\epsilon(n) = a \cdot n^b$$

mit $\epsilon(n)$ = bleibende axiale Dehnung nach n Lastwechseln [‰]

a = Anpassungskoeffizient [-]

b = Anpassungsexponent [-]

Der Exponent b und die mit der Approximationsformel berechnete Dehnung nach 1.000 Lastwechsel $\epsilon_{1.000,calc}$ werden zur Beurteilung der Beständigkeit eines bestimmten Asphaltes hinsichtlich der bleibenden Verformung verwendet.

In der Norm wird angemerkt, dass die tatsächlich in der Straße auftretenden Belastungsbedingungen mit einem einfachen Prüfgerät im Labor nicht nachgebildet werden können, da die reale Belastungszeit, die Beschaffenheit der Straße, die Steifigkeit der anderen Schichten usw. nicht berücksichtigt werden können. Daher sind die angewendeten Lastbedingungen als Näherungswerte für die in der Praxis auftretenden Belastungen anzusehen. Weiter wird angemerkt, dass die Anwendung einer zyklischen Belastung zur Behinderung der Querdehnung gegenüber einer statischen Belastung vorzuziehen ist, da bei zyklischen axialen Belastungen auch radial zyklische Reaktionen auftreten.

Im Rahmen des Forschungsauftrages „Pilotphase Qualitätssicherung in der Querschnittsforschung; Qualitätsplanung im Asphaltstraßenbau – behandelt am Beispiel des Verformungswiderstandes“ wurde von ARAND [Arand 1996] und von der DECKEN [v. d. Decken 1997] eine Prüfeinrichtung entwickelt, bei der die zyklische Axialbelastung mit einer aufgrund des viskoelastischen Verhaltens von Asphalt phasenverschobenen zyklischen Radialbelastung überlagert wird. Eine speziell für diesen Versuchstyp am Institut für Straßenwesen der TU Braunschweig entwickelte Druckzelle ist in der folgenden Abbildung 3-6 dargestellt.

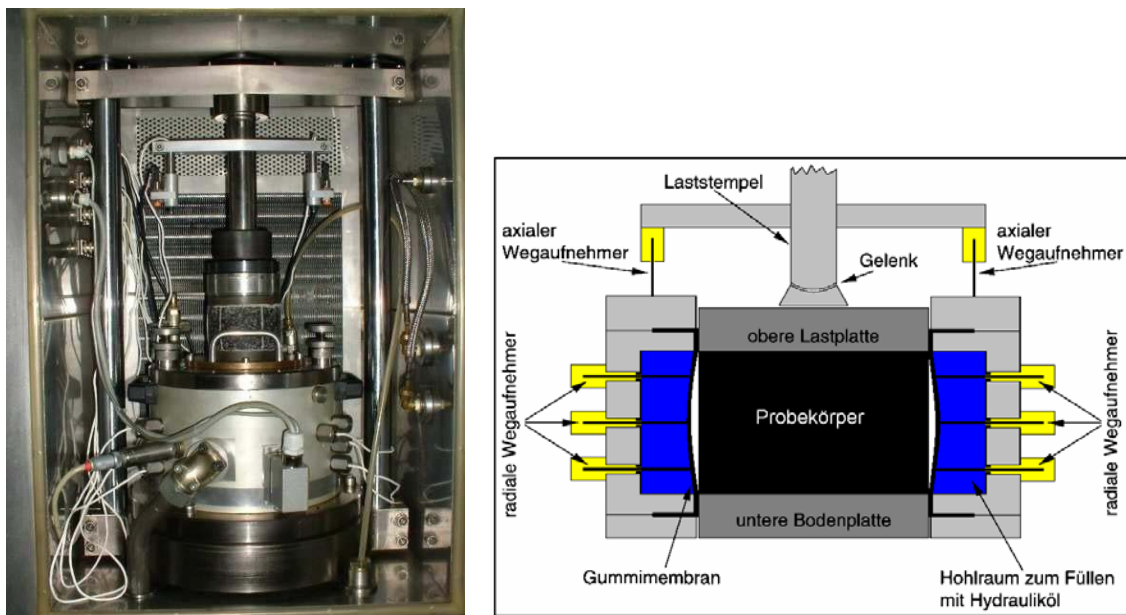


Abb. 3-6: Prototyp der Triaxialprüfmaschine [Arand, v. d. Decken 1996]

Zum Einbau des Probekörpers wird die untere Bodenplatte mittels einer Hydraulik aus der Druckzelle herausgefahren. Der zylindrische Probekörper und die obere Lastplatte werden positioniert und in die Druckzelle befördert. Im Inneren der Druckzelle befindet sich eine Gummimembran, die den Probekörper umschließt. Um eine gezielte radiale Spannung (statisch oder dynamisch) zu erzeugen, wird der Hohlraum zwischen Druckzellenwand und Gummimembran mit Hydrauliköl befüllt. Die axiale Druckbelastung erfolgt über die obere Lastplatte und den Laststempel.

Sowohl die axialen als auch die radialen Verformungen werden von induktiven Wegaufnehmern erfasst. Die axialen Wegaufnehmer sind am Laststempel befestigt und messen den Abstand zur starren Druckzelle. Die radialen Wegaufnehmer sind auf drei Ebenen angeordnet und messen den Abstand der Gummimembran zur Druckzellenwand. Pro Ebene wird ein Mittelwert für die radiale Verformung aus drei um 120° versetzt angeordnete Wegaufnehmer gebildet.

Damit die dynamischen Triaxialversuche bei isothermen Bedingungen gefahren werden können, befindet sich die Druckzelle in einer Kälte-Wärme-Kammer. Zusätzlich wird die Temperatur des im Innern der Druckzelle eingesetzten Hydrauliköls über einen separaten Thermostat geregelt.

Bei diesem dreiaxialen Prüfverfahren müssen die Beanspruchungsgrößen axiale und radiale Spannung, Belastungsgeschwindigkeit, Phasenwinkel und Prüftemperatur sowie die Probekörpergeometrie vor Prüfungsbeginn festgelegt werden.

In der folgenden Tabelle sind die bisher an dem Braunschweiger Prototyp angesetzten Beanspruchungsgrößen und Probekörpergeometrien zusammengefasst und den Vorgaben der DIN EN 12697-25/B sowie einer Niederländischen Prüfanweisung gegenübergestellt.

Tabelle 3-1: Gegenüberstellung der Prüfbedingungen des Triaxialversuches

	DIN EN 12697-25/B	Niederländische Prüfanweisung [Steinauer 2002]	In den Forschungsvorhaben [Arand 1996, Renken 2005] angewendete Prüfbedingungen
axiale Spannungsamplitude	$\sigma_v=0,1\dots0,3$ MPa (Sinusimpuls) $\sigma_B=0,1\dots0,7$ MPa (Blockimpuls)	$\sigma_v=0,3$ MPa (SMA, OPA, AB) $\sigma_v=0,2$ MPa (ABi, ATS)	$\sigma_v = 0,4$ MPa
radiale Spannung (Manteldruck)	$\sigma_c=0,05\dots0,2$ MPa statisch oder dynamisch	$\sigma_c=0,15$ MPa (SMA, OPA, AB) $\sigma_c=0,05$ MPa (ABi, ATS)	$\sigma_c=0,62$ MPa (GA) $\sigma_c=0,12$ (0,10) MPa (SMA) $\sigma_c=0,28$ (0,11) MPa (AB) $\sigma_c=0,11$ MPa (OPA) $\sigma_c=0,06$ MPa (ABi) dynamisch
Belastungsfunktion	Haversine-Impuls- (LP möglich) oder Blockimpuls	Haversine-Impuls (Belast. 0,4 s; LP 0,6s)	Haversine-Impuls ohne LP
Frequenz	1-5 Hz	1 Hz	10 Hz
Phasenverschiebung	-	-	10 ms bzw. 36 °
Temperatur	30 - 50 °C	50°C SMA, OPA, AB 40°C ABi, ATS	40 - 50 °C
Anzahl der LW	10.000	10.000	150.000

	DIN EN 12697-25/B	Niederländische Prüfanweisung [Steinauer 2002]	In den Forschungsvorhaben [Arand 1996, Renken 2005] angewendete Prüfbedingungen
Probekörper- geometrie			
Durchmesser	Größtkorn bis 16mm ≥ 50 mm über 16mm ≥ 75 mm	100 mm	100 mm
Höhe	Größtkorn bis 16mm ≥ 50 mm über 16mm ≥ 75 mm	Größtkorn bis 16mm 60 ± 3 mm über 16mm 80 ± 3 mm	60 – 80 mm
h/d-Verhältnis	Größtkorn bis 16mm 0,6 Größtkorn über 16mm 0,8	> 0,5	0,6 - 0,8

Anmerkungen zur Tabelle 3-1:

- axiale Spannung

Bei den an der in Braunschweig stehenden Prüfmaschine bisher durchgeführten Versuchen wurde eine sinusförmige axiale Druckspannung mit einem unteren Scheitelwert von 0,01 MPa und einem oberen Scheitelwert von 0,8 MPa (Amplitude = 0,4 MPa) erzeugt. Der obere Scheitelwert von 0,8 MPa berechnet sich mit der Annahme einer 11,5 Tonnen Achse und einer Aufstandsfläche mit einem Durchmesser von 300 mm. Die nach der DIN EN 12697-25/B und die nach der niederländischen Prüfanweisung zu erzeugenden axialen Spannungen liegen deutlich unter diesem Wert. In den Niederlanden erfolgt zusätzlich eine Unterscheidung der axialen Spannung nach Deckschichtmaterialien oder Binder- und Tragschichtmaterialien.

- radiale Spannung

Für die Festlegung der aufzubringenden dynamischen radialen Drücke existieren verschiedene Ansichten bzw. Verfahren. Im Forschungsvorhaben [Arand 1996] wurden durch Vorversuche an den zu untersuchenden Materialien die radialen Drücke so festgelegt, dass sich nur geringe bis mäßige Radialdehnungen der Probekörper einstellen. Stauchungen (negative radiale Dehnungen) der Probekörper infolge zu groß aufgebrachter radialer Drücke sollten vermieden werden, weil ein solcher Spannungszustand nur bedingt in der Straßenbefestigung auftritt. Für die aus

Bohrkernen gewonnenen, zu prüfenden Asphalte ergaben sich folgende radiale Spannungen:

Gussasphalt $\sigma_{\text{rad}} = 0,62 \text{ MPa}$

Splittmastixasphalt $\sigma_{\text{rad}} = 0,12 \text{ MPa}$

Asphaltbeton $\sigma_{\text{rad}} = 0,28 \text{ MPa}$.

In einem weiteren Forschungsvorhaben „Optimierung des Triaxialversuchs zur Bewertung des Verformungswiderstandes von Asphalt“ [Renken, 2005] wurde ein neuer Lösungsweg zur Ermittlung der aufzubringenden radialen Spannung entwickelt, mit dem unabhängig von der Asphaltart und -sorte eine materialabhängige radiale Spannung bestimmt werden kann. Die Vorgehensweise dieses Verfahrens gliedert sich in folgende Schritte:

1. Durchführung von mindestens drei Versuchen mit unterschiedlichen Stützdrücken bei einer Dreifachbelegung der Versuche,

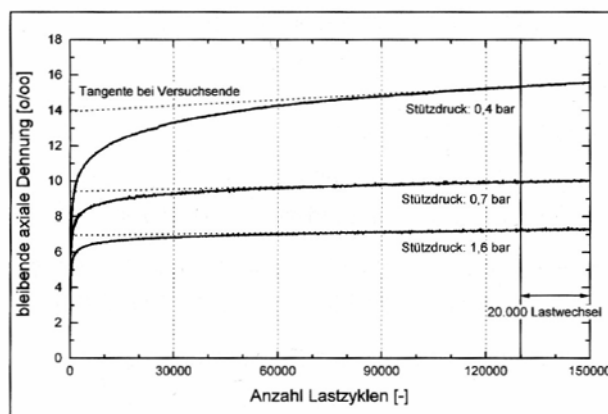


Abb. 3-7: Dehnungskurven, ermittelt mit Triaxialversuchen bei unterschiedlichem Stützdruck [Renken 2005]

2. Ermittlung der Steigung der axialen Dehnungskurven für die letzten 20.000 von 150.000 Lastwechsel in 10^{-6} ‰ pro Lastwechsel,
3. Darstellung der Steigungen an den Versuchsenden über die aufgebrachten Stützdrücke (siehe Abbildung 3-8) sowie Berechnung einer Regressionsfunktion mit der Gleichung

$$\Delta \varepsilon_{\text{ax}} = a + b \cdot e^{\frac{-\sigma_{\text{rad}}}{c}} \quad \text{Gleichung 3-14}$$

mit a,b,c Regressionsparameter

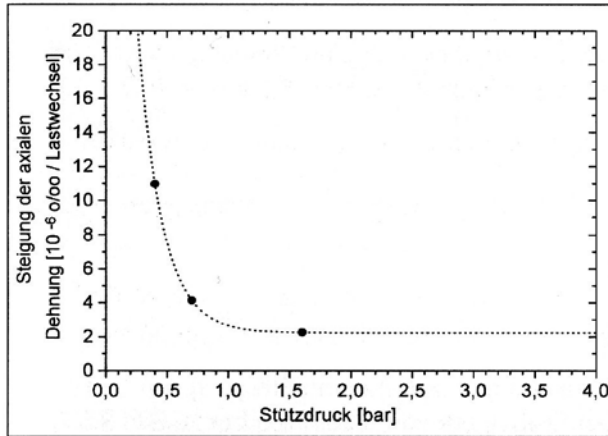


Abb. 3-8: Steigung der axialen Dehnung am Versuchsende aufgetragen über den aufgetragten Stützdruck [Renken 2005]

4. Berechnung der Krümmung dieser Regressionsfunktion,

$$K(\Delta \varepsilon_{ax}) = \frac{\frac{b}{c^2} \cdot e^{-\frac{\sigma_{rad}}{c}}}{\left[1 + \left(-\frac{b}{c} \cdot e^{-\frac{\sigma_{rad}}{c}} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \quad \text{Gleichung 3-15}$$

5. Bestimmung des Maximums der Krümmungsfunktion. Das Maximum dieser Funktion kann rechnerisch durch die Ableitung der Funktion oder grafisch ermittelt werden. Bei der grafischen Auswertung ist allerdings darauf zu achten, dass die optisch erscheinende Krümmung eines Graphen stark von der im Diagramm gewählten Achsskalierung abhängig ist. Abzisse und Ordinate müssen Einheiten gleicher Größenordnung haben, damit die Maxima der berechneten Krümmungsfunktion auch mit den optisch erscheinenden größten Krümmungen zusammenfallen.

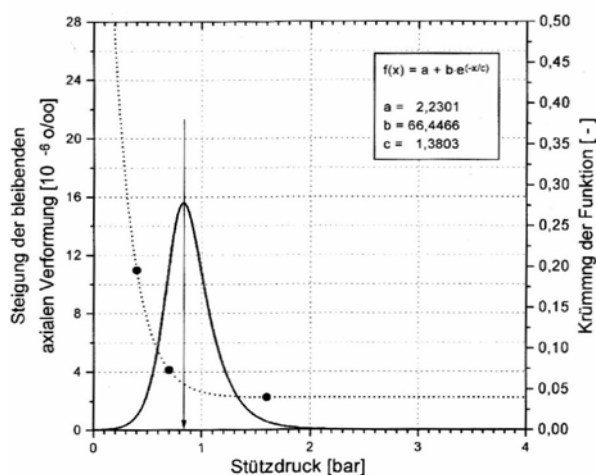


Abb. 3-9: Grafische Ermittlung der maximalen Krümmung der Funktion [Renken 2005]

Es wurden für die im Forschungsvorhaben [Renken 2005] untersuchten Asphalte nach diesem Verfahren folgende Stützdrücke ermittelt:

Asphaltbeton 0/11	0,11 MPa
Splittmastixasphalt 0/11S	0,10 MPa
Offenporigen Asphalt 0/8	0,11 MPa
Asphaltbinder 0/16	0,055 MPa

Die physikalische Bedeutung dieser, für alle Asphalte nach dem beschriebenen Verfahren bestimmten Stützdrücke ist bisher noch nicht geklärt. Bei der Anwendung der mit diesem Verfahren bestimmten Stützdrücke treten teilweise radiale Verformungen auf.

Eine weitere Möglichkeit, den Stützdruck realitätsnah aufzubringen, wäre der Übergang von der Prozesssteuerung zur Prozessregelung, bei der man in Echtzeit die Ausprägungsform der radialen Dehnung zur Erzeugung materialgerechter Ausprägungsformen des Stützdrucks benutzt [Arand 1996]. Diese Lösung wurde maschinentechnisch bisher noch nicht verwirklicht, da dies einen enormen technischen Aufwand bedeuten würde.

Wie die Tabelle 3-1 zeigt, ergibt der Vergleich hinsichtlich der zu erzeugenden radialen Spannungen von den o. g. Ergebnissen mit den Werten des niederländischen Regelwerkes, welches ebenfalls eine Differenzierung der unterschiedlichen Asphalte zulässt, gute Übereinstimmungen. In der Europäischen Norm wird lediglich eine Spannweite der aufzubringenden radialen Spannung vorgegeben.

- Belastungsfunktion und Frequenz

Gemäß der DIN EN 12697-25/B ist eine haversine - impulsförmige (mit und ohne Lastpausen) oder eine blockimpulsförmige Belastungsfunktion zulässig. Die Frequenz der aufgebrachten Last sollte entsprechend der Norm im Bereich von 1 bis 5 Hz liegen. In den Niederlanden und in Deutschland wird die haversine – impulsförmige Belastungsfunktion bevorzugt bei Triaxialversuchen angewendet. Entsprechend der Niederländischen Prüfanweisung besteht der Belastungsimpuls aus einer 0,4 s andauernden Belastung und einer 0,6 s langen Lastpause. Bei dem Braunschweiger

Prototyp der Triaxialprüfmaschine werden die Lasten ohne Lastpause aufgebracht, da eine Anordnung von Lastpausen bisher technisch noch nicht umgesetzt werden konnte. Diese Versuche wurden bisher mit einer Frequenz von 10 Hz durchgeführt, welches einer Fahrzeugüberfahrt mit einer Geschwindigkeit 60 km/h entspricht [FGSV 2006].

- Phasenverschiebung

Die Phasenverschiebung zwischen der sinusförmigen axialen und radialen Druckbelastung, die zur realitätsnahen Ansprache des viskoelastischen Materialverhaltens von Asphalt berücksichtigt werden muss, wurde auf 10 ms – entspricht einem Phasenwinkel von 36° – festgelegt [Arand 1996]. Diese Annahme stützt sich auf Ergebnisse von Triaxialversuchen an Asphaltbeton, Splittmastixasphalt und Gussasphalt, die ohne Radialdruck gefahren wurden. Die dabei gemessenen radialen Dehnungen wiesen ihren maximalen Wert 10 ms nach dem Erreichen des maximalen Spannungswertes auf. Dieses Verhalten wurde in den Forschungsvorhaben [Renken 2005, Leutner 2006] am AB 0/8, SMA 0/11S, OPA 0/8 und ABi 0/16 bestätigt. Eine optische Kontrolle ermöglicht die Aufnahme der Signale mittels Oszilloskop.

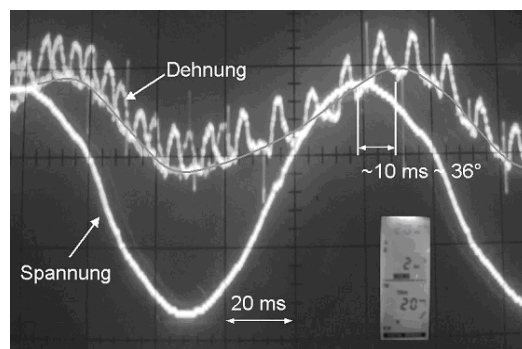


Abb. 3-10: Phasenverschiebung [Leutner 2006]

In der DIN EN 12697-25/B und in der niederländischen Prüfanweisung werden keine Vorgaben bezüglich der Phasenverschiebung angegeben.

- Temperatur

Sowohl die in den Niederlanden vorgeschriebenen als auch die in den bisherigen Forschungsvorhaben aufbrachten Prüftemperaturen erfüllen die gemäß DIN EN 12697-25/B geforderten Temperaturen von 30°C bis 50°C . Nach der niederländi-

schen Prüfanweisung gelten unterschiedliche Prüftemperaturen für Deck-, Binder- oder Tragschichten.

- Anzahl der Lastwechsel

Die Prüfung ist nach 10.000 Belastungszyklen für die Versuche nach den DIN EN und der niederländischen Prüfanweisung zu beenden. Um möglichst viele Informationen über das Verformungsverhalten zu gewinnen, wurden die Triaxialversuche in Braunschweig bis zu 150.000 Lastwechseln gefahren. Dabei können mit der vorhandenen Software für die Messgrößen axiale und radiale Last sowie axiale und radiale Verformung für jeden aufgezeichneten Lastwechsel zehn zeitlich äquidistante Messwerte erfasst werden.

- Probekörpergeometrie

In der DIN EN 12697-25/B werden Mindestmaße für die Probekörper festgelegt. Bei Gesteinskorngrößen ≤ 16 mm des Mischgutes müssen der Durchmesser und die Höhe mindestens 50 mm und bei Gesteinskorngrößen > 16 mm müssen der Durchmesser und die Höhe mindestens 75 mm betragen. Die Druckzelle des Prototypen der Triaxialprüfmaschine ist für zylindrische Probekörper mit einer Höhe von 60 bis 80 mm und einem Durchmesser von 100 mm (Bohrkern und Gyratorprobekörper) oder 101,6 mm (Marshall-Probekörper) ausgelegt. Damit werden die Mindestmaße nach DIN EN erfüllt. Diese Mindestmaße werden auch von den in der niederländischen Prüfanweisung aufgeführten Probekörperabmessungen eingehalten.

Weiter ist in der DIN EN 12697-25/B beschrieben, dass zum Erreichen eines homogenen Belastungszustandes im Probekörper ein Verhältnis der Höhe zum Durchmesser h/d von 1,25 bis 2 [DIN EN 12697-26] notwendig ist. Die Triaxialprüfmaschinen der neuen Generation (TU Wien, TU Dresden), deren Probekörper einen Durchmesser von 100 mm bzw. 150 mm und eine Höhe von 200 mm bzw. 300 mm haben, erfüllen diese Vorgabe.

3.2.1.2 Festlegung der Prüfbedingungen

Das Ziel dieser Arbeit ist es nicht, wie es bisher in den Forschungsarbeiten verfolgt wurde, einen bestimmten Stützdruck zu ermitteln, der eine Einordnung verschiedener Asphalte nach deren Verformungswiderstand bzw. die Erstprüfung der Eignung eines bestimmten Mischgutes ermöglicht. In dieser Arbeit geht es um die Erforschung des

Verformungsverhaltens von verschiedenen Asphalten bei unterschiedlichen Beanspruchungszuständen.

Um dies zu erreichen, werden Versuche bei unterschiedlichen Spannungszuständen, Prüftemperaturen und Belastungsgeschwindigkeiten, wie sie auf der Straße auftreten, durchgeführt. Somit werden die Versuchsbedingungen im Gegensatz zu den bisherigen Forschungsarbeiten und der DIN EN 12697-25/B erweitert bzw. variiert.

Die Spannungszustände, denen der Asphalt auf der Straße ausgesetzt ist, können vorab näherungsweise mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM) und der Mehrschichtentheorie berechnet werden [Wellner, Leutner 2007]. Die Ergebnisse unterscheiden sich hinsichtlich der für die Berechnung ausgewählten Bauklasse, Temperaturen und Achslasten. Aus den verschiedenen Kombinationen dieser Einflussfaktoren ergibt sich eine Vielzahl zu untersuchender Spannungszustände. Im Rahmen dieser Arbeit wurden Belastungskombinationen mit einer Axialspannung von 1,0 MPa (Amplitude 0,5 MPa) und Radialspannungen von 0,3/ 0,6/ 0,9 MPa für eine versuchstechnische Untersuchung ausgewählt.

Im Gegensatz zu den bisher an Marshall-Probekörpern durchgeführten Triaxialversuchen sind diese ausgewählten Radialspannungen deutlich größer. Mit der Kenntnis, dass Bohrkerne aus walzsektor-verdichteten Platten, die wegen der praxisnahen Verdichtung in dieser Arbeit verwendet werden, einen geringeren Verformungswiderstand besitzen als Marshall-Probekörper, ist eine Erhöhung der Radialspannungen plausibel. Ob die rechnerisch ermittelten Werte zu radialen Stauchungen führen, ist versuchstechnisch zu klären.

Um den Beanspruchungszustand realitätsnah widerzuspiegeln, wurde die Radialspannung bei den Triaxialversuchen durch dynamisch aufgebrachte Lasten erzeugt.

Im Versuchsprogramm ist weiterhin die Untersuchung des Einflusses kleinerer Frequenzen auf das Verformungsverhalten mit 5 Hz und 3,33 Hz vorgesehen, da besonders bei geringen Geschwindigkeiten und folglich langer Belastungsdauer Verformungen begünstigt werden. Eine weitere Verringerung der Frequenz ist mit der zur Verfügung stehenden Prüfmaschine nicht erreichbar. Die Prüftemperatur wurde auf 30 °C und 50 °C festgelegt.

Das Versuchsprogramm setzt sich wie folgt zusammen:

Tabelle 3-2: Versuchsprogramm – dynamischer Triaxialversuch (Triax)

Asphaltvariante	Frequenz	Temp.	axiale Spannung	radiale Spannung	Phase	Belegung
AB 0/11 S SMA 0/11S (Norddeutschland) SMA 0/11S (Süddeutschland) OPA 0/8 ABi 0/16 S ATS 0/32 CS	10 Hz 5 Hz 3,33 Hz	30 °C 50 °C	1,0 MPa	0,3 MPa 0,6 MPa 0,9 MPa	36°	3-fach

3.2.2 Einaxialer Druckschwellversuch (DSV)

3.2.2.1 Versuchsbeschreibung

Der Druckschwellversuch ist ein einaxialer Druckversuch mit schwellendem Axialdruck und wird in Deutschland nach der TP A-StB Teil: „Einaxialer Druckschwellversuch – Bestimmung des Verformungsverhaltens von Walzasphalten bei Wärme“ [FGSV 1999] durchgeführt.

Die Technische Prüfvorschrift beschreibt ein Verfahren, mit dem das Verformungsverhalten von Asphalt bei hohen Gebrauchstemperaturen unter dynamischer Beanspruchung angesprochen werden kann.

Dabei wird ein zylindrischer Asphaltprobekörper bei isothermen Versuchsbedingungen einer auf der Grundfläche des Probekörpers gleichmäßig verteilten haversine-impulsförmigen Druckschwellbelastung unterworfen. Als Probekörper werden orthogonal planparallel nass geschliffene Marshall-Probekörper oder aus im Labor hergestellten Platten gebohrte Kerne mit den gleichen Abmessungen verwendet. Der Versuchsaufbau ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

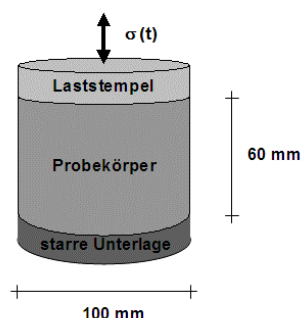


Abb. 3-11: Einaxialer Druckschwellversuch nach TP A-StB – Versuchseinrichtung

Der zeitliche Verlauf der Beanspruchung ist nach der TP eine Abfolge von Lastimpulsen und Lastpausen, siehe Abbildung 3-12.

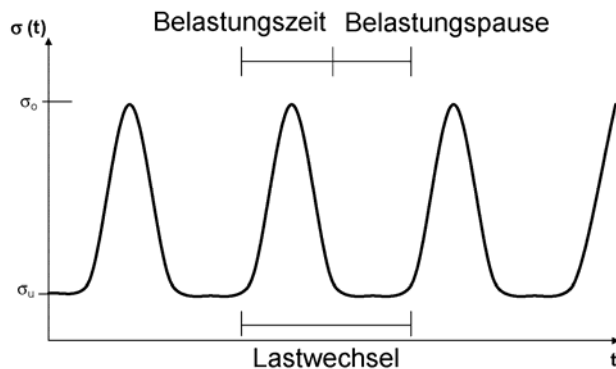


Abb. 3-12: Einaxialer Druckschwellversuch nach TP A-StB – Belastung [FGSV 1999]

Auf den Probekörper ist entsprechend der Technischen Prüfvorschrift eine Unterlast von 0,2 kN und eine Oberlast, die für Walzasphalte mit besonderer Belastung mit 2,8 kN bzw. für Walzasphalte mit normaler Beanspruchung mit 1,6 kN angenommen wird, aufzubringen. Bei einem Probekörperdurchmesser von 100 mm beträgt somit die Unterspannung σ_u 0,025 MPa und die Oberspannung σ_o 0,35 MPa bzw. 0,2 MPa. Die Prüftemperatur ist auf 50 °C festgelegt. Um die Reibungskräfte zwischen dem Laststempel und den Probekörperendflächen zu minimieren, werden diese mit Silikonfett und Grafitflocken präpariert.

Während des Versuches wird für jeden Belastungszyklus die sich am Probekörper einstellende Verformung in Belastungsrichtung über induktive Wegaufnehmer an der Traverse erfasst, siehe Abbildung 3-11. Die Grundlage der Auswertung bildet nach der TP die in Abbildung 3-13 schematisch dargestellte Impulskriechkurve, die den Verlauf der irreversiblen Verformung des Probekörpers wiedergibt.

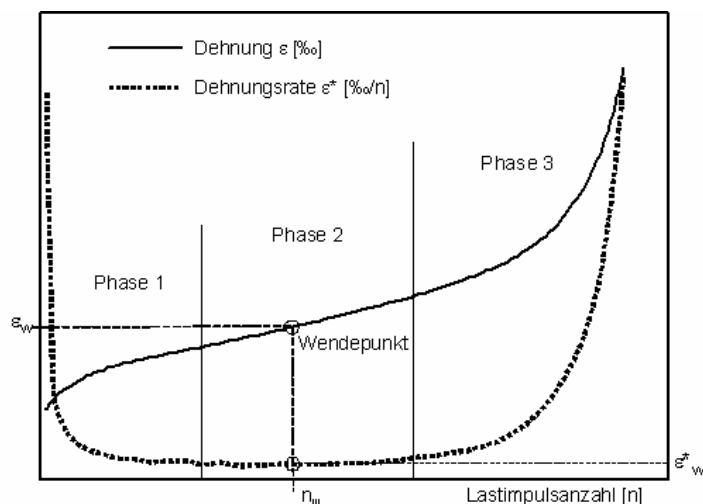


Abb. 3-13: Impulskriechkurve, ermittelt mit dem einaxialen Druckschwellversuch [FGSV 1999]

Eine Impulskriechkurve entsteht durch Summierung der einzelnen Anteile an irreversiblen Verformungen. Die Impulskriechkurve lässt sich in drei Phasen gliedern:

- Die erste Phase beginnt mit starken Verformungen mit progressiv abnehmender Verformungsgeschwindigkeit (Konsolidierung).
- Es folgt eine zweite Phase mit nahezu konstanter Verformungsgeschwindigkeit (volumenkonstante Formänderung). In dieser Phase befindet sich der Wendepunkt der Impulskriechkurve.
- In der dritten Phase nimmt die Verformung progressiv zu (beginnende und fortschreitende volumendilatante Gefügezerstörung des Probekörpers).

Für die Beurteilung des Verformungsverhaltens ist der Kurvenverlauf in der zweiten Phase von besonderer Bedeutung. Als maßgebende Parameter werden deshalb die folgenden charakteristischen Größen festgelegt:

n_w = Lastimpulszahl im Wendepunkt [-]

ε_w = Dehnung im Wendepunkt [‰]

ε_w^* = Dehnungsrate im Wendepunkt [‰/10⁴ n]

Für die Bestimmung dieser Größen werden in der TP drei Verfahren beschrieben. Wird im Versuchsablauf kein Wendepunkt erreicht, so gilt nach TP die Steigung der Kurve im quasi-linearen Bereich als Dehnungsrate.

Der Versuch gilt nach der TP als beendet, wenn mehr als 10.000 Lastwechsel erreicht werden oder eine Dehnung von 40 ‰ überschritten wird.

Es liegen bisher positive Erfahrungen für Splittmastixasphalte [Karcher 2005] sowie nach dem Betonprinzip zusammengesetzte Asphalte vor. Die Untersuchungen des Verformungswiderstandes bei offenporigen Asphaltdeckschichten haben gezeigt, dass mit den Ergebnissen des einaxialen Druckschwellversuches auf die Verformungseigenschaften dieses Asphaltes nicht geschlossen werden kann [Renken 1998]. Dies wird damit begründet, dass im Vergleich zu konventionellem Asphaltmischgut beim offenporigen Asphalt nach Versuchsende deutlich größere Verformungswerte festgestellt wurden. Diese Feststellung ist in sofern widersprüchlich, da aus der Praxis bekannt ist, dass offenporiger Asphalt in der Regel verformungsbeständiger ist als Asphaltbeton und Splittmastixasphalt.

In der DIN EN 12697-26/D wird ein ähnliches Prüfverfahren beschrieben, welches allerdings als primäres Ziel die Bestimmung des Elastizitätsmoduls hat. Das Prüfverfahren unterscheidet sich dabei von dem zuvor beschriebenen hinsichtlich der Probekörpergeometrie und der Prüfbedingungen. Um einen homogenen Belastungszustand im Probekörper bei der Ermittlung des komplexen E-Moduls zu erreichen, wird in dieser Norm ein h/d -Verhältnis von 1,8 bis 3,0 vorgeschrieben. Die Verformungsmessung erfolgt nicht über die gesamte Probekörperhöhe, sondern im mittleren Bereich des Probekörpers. Extensometer werden mit der Probe verbunden und sind in der Lage die Verformungen in dem homogen belasteten Bereich zu erfassen, siehe Abbildung 3-14.

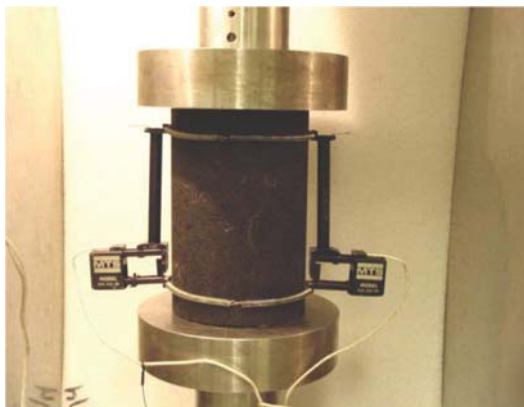


Abb. 3-14: Messsystem am Probekörper [Clyne 2003]

3.2.2.2 Festlegung der Prüfbedingungen

Um sowohl Aussagen zur bleibenden Verformung sowie zum Elastizitätsmodul von den in dieser Arbeit zu untersuchenden Asphalten treffen zu können, ist es sinnvoll, schlanke Probekörper für die einaxialen Druckschwellversuche zu verwenden. Im Rahmen von Vorversuchen wurde ein Messsystem am Probekörper entwickelt, welches aufgrund einer dafür notwendigen Umrüstung der dynamischen Prüfmaschine zeitnah nicht umgesetzt werden konnte. Somit wurden die Verformungen über die gesamte Probekörperhöhe erfasst. Die Probekörpergeometrie entsprach mit einem Durchmesser von 100 mm und einer von der TP abweichenden Höhe von 80 mm, den gewählten Abmessungen der Probekörper der Triaxialversuche.

Als Probekörper werden nicht die üblich verwendeten Marshall-Probekörper, sondern orthogonal planparallele, nass geschliffene Bohrkerne aus im Laboratorium hergestellten walzsektor-verdichteten Asphaltprobepplatten verwendet.

Bei der Versuchsdurchführung wurden keine Lastpausen im zeitlichen Verlauf der Beanspruchung berücksichtigt, um den Vergleich zu den anderen in dieser Arbeit ohne Lastpause durchgeführten Prüfverfahren zu ermöglichen und den zusätzlichen Einfluss der Lastpause bei der Auswertung zu eliminieren. Die Belastungszeit wird wie bei dem zuvor beschriebenen dynamischen Triaxialversuch mit 0,1; 0,2 und 0,3 s (10, 5 und 3,33 Hz) variiert.

Um den Lasteinfluss zu ermitteln, werden die Versuche mit drei Oberspannung (0,15; 0,3; 0,45 MPa) und einer jeweiligen Unterspannung von 0,02 MPa durchgeführt. Eine weitere Variationsgröße in dieser Arbeit stellt die Temperatur dar. Zusätzlich zu den in der TP vorgeschriebenen 50 °C werden die einaxialen Druckschwellversuche bei 40 °C und 30 °C durchgeführt.

Die Reibung zwischen Laststempel und Probekörperendfläche wird nicht mit der Variante Silikonfett und Grafitflocken minimiert, sondern mit Glycerin und Teflonfolie. Voruntersuchungen untermauern diese Vorgehensweise (siehe Kapitel 4.2.1).

Einige einaxialen Druckschwellversuche konnten bedingt durch die gering belastende Beanspruchungskombination (z.B. 30°C; 0,15 MPa) und der dadurch geringen Schädigung bis 100.000 Lastwechseln gefahren werden.

Das Versuchsprogramm setzt sich wie folgt zusammen:

Tabelle 3-3: Versuchsprogramm – einaxialer Druckschwellversuch (DSV)

Asphaltvariante	Frequenz	Temperatur	axiale Spannung	Belegung
AB 0/11 S SMA 0/11S (Norddeutschland) SMA 0/11S (Süddeutschland) ABi 0/16 S ATS 0/32 CS	10 Hz 5 Hz 3,33 Hz	30 °C 40 °C 50 °C	0,15 MPa 0,30 MPa 0,45 MPa	3-fach

3.2.3 Dynamischer Stempelndringversuch (DSEV)

3.2.3.1 Versuchsbeschreibung

Entwickelt wurde der dynamische Stempelndringversuch im Rahmen des Forschungsvorhabens „Pilotphase Qualitätssicherung in der Querschnittsforschung; Qualitätsplanung im Asphaltstraßenbau – behandelt am Beispiel des Verformungswiderstandes“ [Arand, v. d. Decken 1996]. Bis zum jetzigen Zeitpunkt wurde für diesen Versuch zur Bestimmung des Verformungswiderstandes von Walzasphalten noch keine Technische Prüfvorschrift erstellt. Es existiert bereits ein 1. Entwurf [FGSV 2003], in dem Kenntnisse aus dem Forschungsvorhaben „Überprüfung der Eignung des dynamischen Stempelndringversuches zur Beurteilung der Verformungseigenschaften von Asphalt und Schaffung eines Bewertungshintergrundes“ [Leutner 2003] eingeflossen sind.

Bei diesem Versuch wird ein zylindrischer Walzasphaltprobekörper ($\varnothing 200$ mm) mit ebener Grundfläche über einen mittig aufgesetzten Stempel mit einem Durchmesser von 80 mm einer Druckschwellbeanspruchung ausgesetzt, siehe Abbildung 3-15.



Abb. 3-15: Dynamischer Stempelndringversuch [Arand, v. d. Decken 1996]

Die in der vorläufigen Prüfvorschrift zugrunde gelegte Impulsbelastung setzt sich aus einer Abfolge von Lastimpulsen und Lastpausen entsprechend der TP A-StB Teil: „Einaxialer Druckschwellversuch – Bestimmung des Verformungsverhaltens von Walzasphalten bei Wärme“ [FGSV 1999] zusammen. Die Oberspannung σ_o ist auf 0,8 MPa und die Unterspannung σ_u auf 0,02 MPa festgelegt.

Aus der wiederholten Belastung wird die resultierende Stempelndringtiefe unter dem Stempel in Abhängigkeit von der Anzahl der Lastwechsel bei einer Prüftemperatur von 50 °C registriert. In der folgenden Abbildung sind drei typische Kurvenverläufe von verformungsbeständigen (steifen) bis weniger verformungsbeständigen (weichen) Walzasphalten dargestellt.

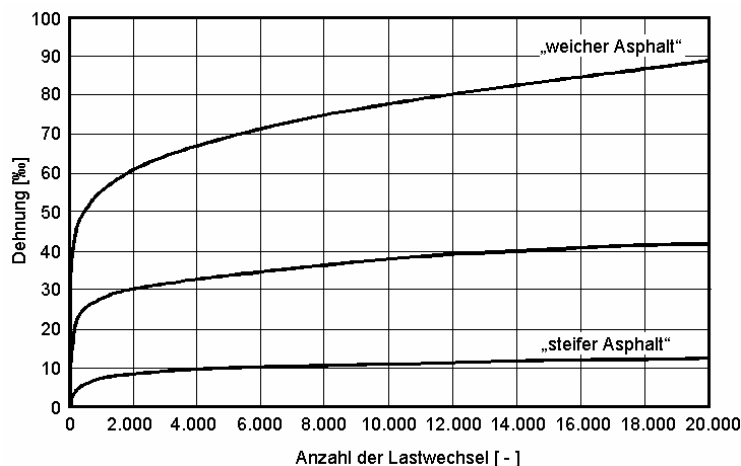


Abb. 3-16: Typische Dehnungsverläufe, ermittelt mit dynamischen Stempleindringversuchen [Leutner 2006]

Im Gegensatz zu den beim einaxialen Druckschwellversuch ermittelten Impulskriechkurven bestehen die hier ermittelten Impulskriechkurven nur aus den ersten beiden Phasen (Konsolidierung und volumenkonstante Formänderung). Ein Wendepunkt der Impulskriechkurve konnte bisher nicht festgestellt werden.

Als vergleichbares Ergebnis des dynamischen Stempleindringversuches wird die Stempleindringtiefe nach 10.000 Lastwechseln herangezogen.

Als Probekörper werden Bohrkerne aus Asphaltplatten, die mit dem Walzsektor-Verdichtungsgerät hergestellt werden, verwendet. Der Durchmesser der Probekörper beträgt 200 mm bei einer Höhe von 40 mm für Asphaltdeckschichtmischgut und von 50 mm für Asphaltbinderemischgut.

Da bei diesem Prüfverfahren keine flächendeckende Belastung des Probekörpers erfolgt und damit kein homogener Spannungszustand im Probekörper herrscht, eignen sich die Ergebnisse nicht zur Materialkennwertbestimmung. Vielmehr eignen sie sich aufgrund des inhomogenen Spannungszustandes zur Validierung von Stoffmodellen, die für analytische Dimensionierungsprogramme benötigt werden.

3.2.3.2 Festlegung der Prüfbedingungen

Um die Vergleichbarkeit zu dem dynamischen Triaxialversuch und dem einaxialen Druckschwellversuch zu gewährleisten, wird auch bei diesem Prüfverfahren auf die Anordnung von Lastpausen verzichtet.

Es wurde wie bei den vorher beschriebenen Prüfverfahren eine Variation der Belastungsfrequenz mit 10, 5 und 3,33 Hz und eine Variation der Prüftemperatur mit 30, 40 und 50 °C bei der Aufstellung des Prüfprogramms vorgesehen. Der Lasteinfluss wird mit drei verschiedenen Oberspannungen (0,3; 0,6; 0,9 MPa) und einer jeweiligen Unterspannung von 0,02 MPa ermittelt.

Der Versuch gilt nach der vorläufigen Prüfvorschrift als beendet, sobald 10.000 Lastwechsel aufgebracht worden sind. Um das Materialverhalten über einen längeren Belastungszeitraum zu erforschen und eventuell einen Wendepunkt in der Impulskriechkurve zu ermitteln, werden die Probekörper bis maximal 100.000 Lastwechsel beansprucht.

Bisher wurden noch keine dynamischen Stempeleindringversuche an Asphalttragschichtmaterial durchgeführt. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Höhe dieser Probekörper auf 80 mm festgelegt.

Das Versuchsprogramm setzt sich wie folgt zusammen:

Tabelle 3-4: Versuchsprogramm - dynamischer Stempeleindringversuch (DSEV)

Asphaltvariante	Frequenz	Temperatur	axiale Spannung	Belegung
AB 0/11 S	10 Hz 5 Hz 3,33 Hz	30 °C 40 °C 50 °C	0,3 MPa 0,6 MPa 0,9 MPa	3-fach
SMA 0/11S (Norddeutschland)				
SMA 0/11S (Süddeutschland)				
OPA 0/8				
ABi 0/16 S				
ATS 0/32 CS				

3.2.4 Spurbildungsversuch

3.2.4.1 Versuchsbeschreibung

Der Spurbildungsversuch wird in der vorläufigen Technischen Prüfvorschriften für Asphalt Teil 22 Spurbildungsversuche beschrieben und wurde im Rahmen dieser Arbeit nach diesen Vorgaben durchgeführt. Zwei Asphaltprobeplatten werden in je einem der beiden Metallrahmen der Prüfapparatur starr eingespannt. Die Probeplatten werden gleichzeitig durch jeweils ein vor- und zurückrollendes Vollgummirad wiederholt belastet und vor sowie während des Prüfvorganges in einem Luftbad temperiert, siehe Abbildung 3-17.



Abb. 3-17: Spurbildungsversuch

Unter der wiederholten Belastung bildet sich eine Spurrinne aus, deren Tiefe sich in Abhängigkeit von der Anzahl der Überrollungen als Verformungs-Zeit-Kurve darstellen lässt. Der Versuch wird entweder nach 20.000 Überrollungen oder nach Erreichen einer Spurrinnentiefe von 20 mm beendet.

3.2.4.2 Festlegung der Prüfbedingungen

Bei diesem Prüfverfahren werden die Prüfbedingungen nicht wie bei den vorherigen Prüfverfahren variiert. Die Ergebnisse der Spurbildungsversuche sollen lediglich ein Ranking der zu untersuchenden Asphaltvarianten ermöglichen.

Die Versuche wurden bei einer Prüftemperatur von 50 °C und einer Radlast von 700 N durchgeführt.

3.3 UNTERSUCHTE ASPHALTVARIANTEN

3.3.1 Herkunft/ Zusammensetzung

Um praxisgerechtes Asphaltmischgut zu erhalten, wurde das zu untersuchende Mischgut in Mischanlagen hergestellt und aus der laufenden Produktion entnommen. In der folgenden Tabelle sind die untersuchten Asphaltvarianten mit der jeweiligen Gesteinsart und dem Bitumen sowie dem herstellenden Mischwerk aufgelistet.

Tabelle 3-5: Untersuchte Asphaltvarianten

Asphaltvariante	Abkürzung	Gestein	Bindemittel	Mischwerk
AB 0/11S	AB	Moräne (Wullenstetten)	50/70 (Esso)	Kirchhoff Asphaltmischwerke GmbH & Co. KG Stuttgart Weilimdorf
SMA 0/11S (Norddeutschland)	SMA I	Gabbro (Bad Harz- burg)	PmB45 A (Caribit, Shell)	ISV Ilseder Mischwerke GmbH & Co. KG Osloss
SMA 0/11S (Süddeutschland)	SMA II	Moräne (Wullenstetten)	PmB45A (Olexobit, BP)	Asphaltmischwerke Donau-Iller GmbH & Co. KG Ehingen
OPA 0/8	OPA	Kiessplitt	PmBH (Olexobit 40- 100/65H, BP)	Hohenloher Asphalt- Mischwerke GmbH & Co. KG Heilbronn
ABi 0/16S	ABi	Moräne (Wullenstetten)	PmB45A (Olexobit, BP)	Asphaltmischwerke Donau-Iller GmbH & Co. KG Ehingen
ATS 0/32CS	ATS	Muschelkalk (Mönsheim)	50/70 (Esso)	Kirchhoff Asphaltmischwerke GmbH & Co. KG Mönsheim

3.3.2 Ergebnisse der Kontrollprüfungen

Die Ergebnisse der durchgeführten Kontrolluntersuchungen an den verschiedenen Asphalten sind im Anhang A zusammengestellt. Die Anforderungen nach ZTV Asphalt-StB 01 bzw. ZTV T-StB 95 wurden erfüllt.

3.3.3 Probekörperherstellung

Um eine praxisgerechte Verdichtung zu erreichen, wurden keine Marshall-Probekörper hergestellt, sondern Probekörper aus walzsektor-verdichteten Asphaltplatten gebohrt.

Die Asphaltplatten wurden im Walzsektor-Verdichtungsgerät nach dem Braunschweiger Verdichtungsprogramm hergestellt. Dieses Programm beinhaltet eine weggeregelte Vorverdichtung, die der Leistung einer Einbaubohle eines Asphaltfertigers entspricht, und eine kraftgeregelte Hauptverdichtung, die der Verdichtungswirkung einer Glattmantelwalze entspricht. Die Vor- und Hauptverdichtung sind jeweils in drei Phasen eingeteilt.

Weggeregelte Vorverdichtung:

- Vorbelastung: Für die weggeregelte Vorverdichtung wird der Walzsektor bis knapp über die Probenoberfläche abgesenkt und dann mit einer Geschwindigkeit von 0,5 mm pro Walzübergang nach unten bewegt. Zum Erreichen des Weges von 0,5 mm ist nach jedem Walzübergang eine zunehmende Kraft erforderlich. Die Vorbelastung wird beendet, sobald die Verdichtungskraft einen Wert von 2,0 kN erreicht hat.
- Halten: Es werden fünf Walzübergänge bei unverändertem Weg ausgeführt.
- Entlasten: Der Walzsektor wird mit 0,5 mm pro Walzübergang von der Mischgutprobe entfernt, bis die Probe vollständig entlastet ist.

Kraftgeregelte Hauptverdichtung:

- Glätten: Zum Glätten werden 15 Walzübergänge mit der geringen Last von 0,1 kN ausgeführt.
- Verdichten: Die Last wird stufenweise (Laststeigerung von 1 kN je Walzübergang) bis zum Erreichen der Höchstlast von 15 kN gesteigert. Dazu sind insgesamt 15 Walzübergänge erforderlich.
- Entlasten: Mit der Entlastungsphase wird ein nochmaliges Glätten der Probe erreicht. Dabei sinkt die Belastung in Stufen von 1 kN bei 15 Walzübergängen bis auf Null ab.

Um einen praxisgerechten Verdichtungsgrad zu erreichen, wurde die Zahl der Übergänge in der kraftgeregelten Hauptverdichtung entsprechend der Asphaltvariante angepasst (s. Tabelle 3-6).

Die Temperatur des zu verdichtenden Mischgutes ist bei Verwendung von polymer-modifizierte Bitumen auf 145 °C und bei Verwendung von Straßenbaubitumen der Sorte 50/70 auf 135 °C festgelegt worden.

Tabelle 3-6: Vorgaben der Verdichtung mit dem Walzsektor-Verdichter

Asphaltvariante	Übergänge (Glätten, Verdichten, Entlasten)	Kraft	Temperatur
AB	16 / 16 / 16	15 kN	135 °C
SMA I	16 / 16 / 16	15 kN	145 °C
SMA II	14 / 14 / 14	15 kN	145 °C
OPA	12 / 12 / 12	15 kN	145 °C
ABi	16 / 16 / 16	15 kN	145 °C
ATS	8 / 8 / 6	15 kN	135 °C

An den Probekörpern wurden die relative Raumdichte ρ_A , der Hohlraumgehalt H_{bit} und der Verdichtungsgrad k bestimmt. Die einzelnen Werte sind den Anhängen B, D und F zu entnehmen.

4 UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE

4.1 VERFORMUNGSVERHALTEN VON ASPHALT BEI HOHEN TEMPERATUREN

Im Folgenden werden die Ergebnisse der dynamischen Triaxialversuche, der einaxialen Druckschwellversuche sowie der dynamischen Stempeleindringversuche und Spurbildungsversuche dargestellt. Dabei werden die Einflüsse der systematisch variierten Belastungsgrößen – Temperatur, Frequenz und Last – auf die elastischen und bleibenden Probekörperverformungen beschrieben.

Zur Auswertung der Versuchsergebnisse ist anzumerken, dass die präzise Bestimmung der Verformung durch das Phänomen der Prüfstreuung beeinträchtigt sein kann, welches typisch für Prüfverfahren mit dynamischer Belastung ist. Die Prüftechnik und das Verfahren selbst begünstigen ebenso wie die Eigenschaften des Probekörpers die Prüfstreuungen.

4.2 VORUNTERSUCHUNGEN

Im Rahmen der Voruntersuchungen wird unter anderem der Einfluss der Reibung zwischen den Endflächen der Probekörper und dem Laststempel auf das Verformungsverhalten analysiert. Diese Problematik wurde bereits in dem Forschungsvorhaben „Festlegung von einheitlichen Prüf- und Auswertungskriterien im dynamischen Druckschwellversuch im Hinblick auf die Entwicklung eines standardisierten dynamischen Prüfgerätes“ [Hiersche 1992] untersucht. Darüber hinaus wurden in dieser Arbeit Vorversuche mit einer Triaxialversuchsreihe und weiteren Variationen der Endflächenbeschichtung durchgeführt.

Zu dem Thema „Einfluss des Verhältnisses der Höhe zum Durchmesser“ (h/d -Verhältnis) auf den Verformungswiderstand kann in der Literatur auf zahlreiche Quellen zurückgegriffen werden. Um einen homogenen Belastungszustand im Probekörper zu erreichen, werden für bestimmte Prüfverfahren schlanke Asphaltprobekörper vorgeschrieben. Der sich in der Mitte des belasteten Probekörpers – ohne Einflüsse aus den Lasteinleitungsbereichen – bildende homogene Spannungszustand und die Verformungen in diesem Bereich ermöglichen eine genaue Bestimmung von Materialkennwerten. Im Zuge der Vorversuche wurde die Herstellung von schlanken Probekörpern optimiert und ein Messsystem entwickelt, welches die Verformungen des Probekörpers nicht wie bisher üblich über die gesamte Probekörperhöhe sondern nur im mittleren Bereich erfasst.

4.2.1 Reibung zwischen Laststempel und Probekörperendfläche

Wird ein Probekörper ohne Vorbehandlung der Endflächen in den Prüfstand eingebaut, haftet der Probekörper während der Versuchsdurchführung an der oberen Lastplatte und der unteren Bodenplatte. Durch die Reibung zwischen Laststempel und Probekörperendfläche wird die Querdehnung der Probekörper behindert, wodurch Spannungen im Lasteinleitungsbereich erzeugt werden. Diese Spannungen bewirken eine Stützung des Asphaltes im Lasteinleitungsbereich und die Radial- und Axialdehnungen verkleinern sich.

Um die Reibung zwischen dem Laststempel und der Probekörperendfläche (Endflächenreibung) und somit den Einspanngrad so gering wie möglich zu halten, wurde zunächst die Auswirkung verschiedener Endflächenbehandlungen auf die Ergebnisse der Triaxialversuche untersucht. Dazu wurden die Probekörper vor der Versuchsdurchführung an den Endflächen mit einer Schleifmaschine orthogonal planparallel geschliffen und die Endflächen wie folgt präpariert:

- 0,2 – 0,3 g Siliconfett plus Graphitflocken plus Teflonfolie,
- Glycerin-Dextrin-Gemisch plus Teflonfolie,
- eine Scheibe Teflonfolie,
- ohne Vorbehandlung.

Pro Variante wurden mit einem nicht im Prüfumfang enthaltenen, aber am Anfang der Arbeit für Vorversuche zur Verfügung stehenden Material (Asphaltbinder 0/16 mit einem Bitumen 50/70) jeweils zwei Triaxialversuche bei 50 °C, 10 Hz, einer Axialspannung von 0,8 MPa und einer Radialspannung von 0,08 MPa durchgeführt. Als Probekörper wurden Bohrkern aus walzsektor-verdichteten Platten mit einer Höhe von 80 mm und einem Durchmesser von 100 mm verwendet. Die maximale Höhe der Probekörper ist auf 80 mm begrenzt, da die Triaxialprüfanlage der TU Braunschweig für Probekörper nur bis zu dieser Höhe konzipiert ist.

Die Mittelwerte der gemessenen bleibenden axialen und radialen Dehnungen nach 70.000 Lastwechseln sind für den Vergleich des Einflusses der unterschiedlichen Endflächenbehandlungen auf die Dehnung in der folgenden Abbildung dargestellt.

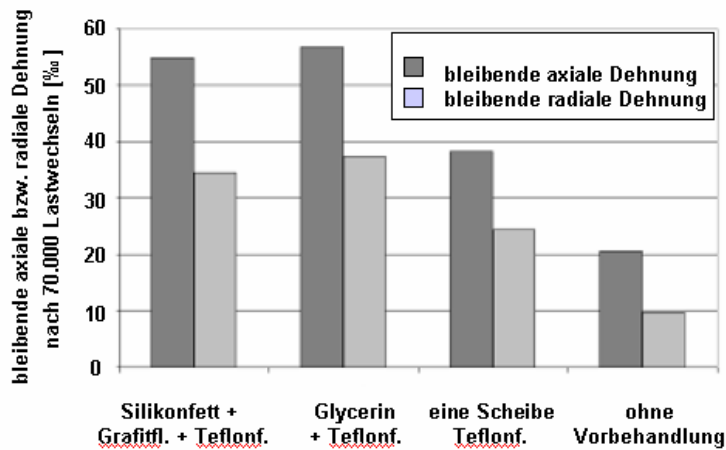


Abb. 4-1: links: Ergebnisse der Triaxialversuche – Einfluss der Endflächenreibung, rechts: ohne Vorbehandlung

Die größten bleibenden axialen und radialen Dehnungen werden mit der Beschichtung Silikonfett + Grafitflocken + Teflonfolie sowie mit der Variante Glycerin + Teflonfolie erreicht. Die Probekörper, die ohne Vorbehandlung der Endflächen geprüft wurden, deformieren am geringsten. Bei der Variante mit einer Scheibe Teflonfolie ist die Endflächenreibung noch so groß, dass sie das Dehnungsverhalten des Probekörpers deutlich beeinflusst.

Der Verlauf der durch die Reibung zwischen Laststempel und Probekörperendfläche erzeugten Spannungen im Lasteinleitungsbereich ist in der Abbildung 4-2 skizziert.



Abb. 4-2: Spannungen im Lasteinleitungsbereich bei verschiedenen Endflächenbeschichtungen (Skizze)

Die Spannungen laufen bei den verwendeten Endflächenbeschichtungen zur Mitte des Probekörpers unterschiedlich stark keilförmig zusammen. In diesen Bereichen wird das Material noch durch die Endflächenreibung gestützt. Je geringer die Reibung zwischen Laststempel und Probekörperendfläche ist, desto flacher ist der Spannungskeil mit stützender Wirkung und umso mehr verformt sich der Probekörper. Mit Hilfe einer FE - Berechnung mit der Software REFEM 3D [Oeser 2004] wurde der radiale Spannungsverlauf und die resultierenden radialen Verformungen bei einer geringen und einer starken Reibung zwischen Laststempel und Probekörperendfläche berechnet und in der folgenden Abbildung dargestellt.

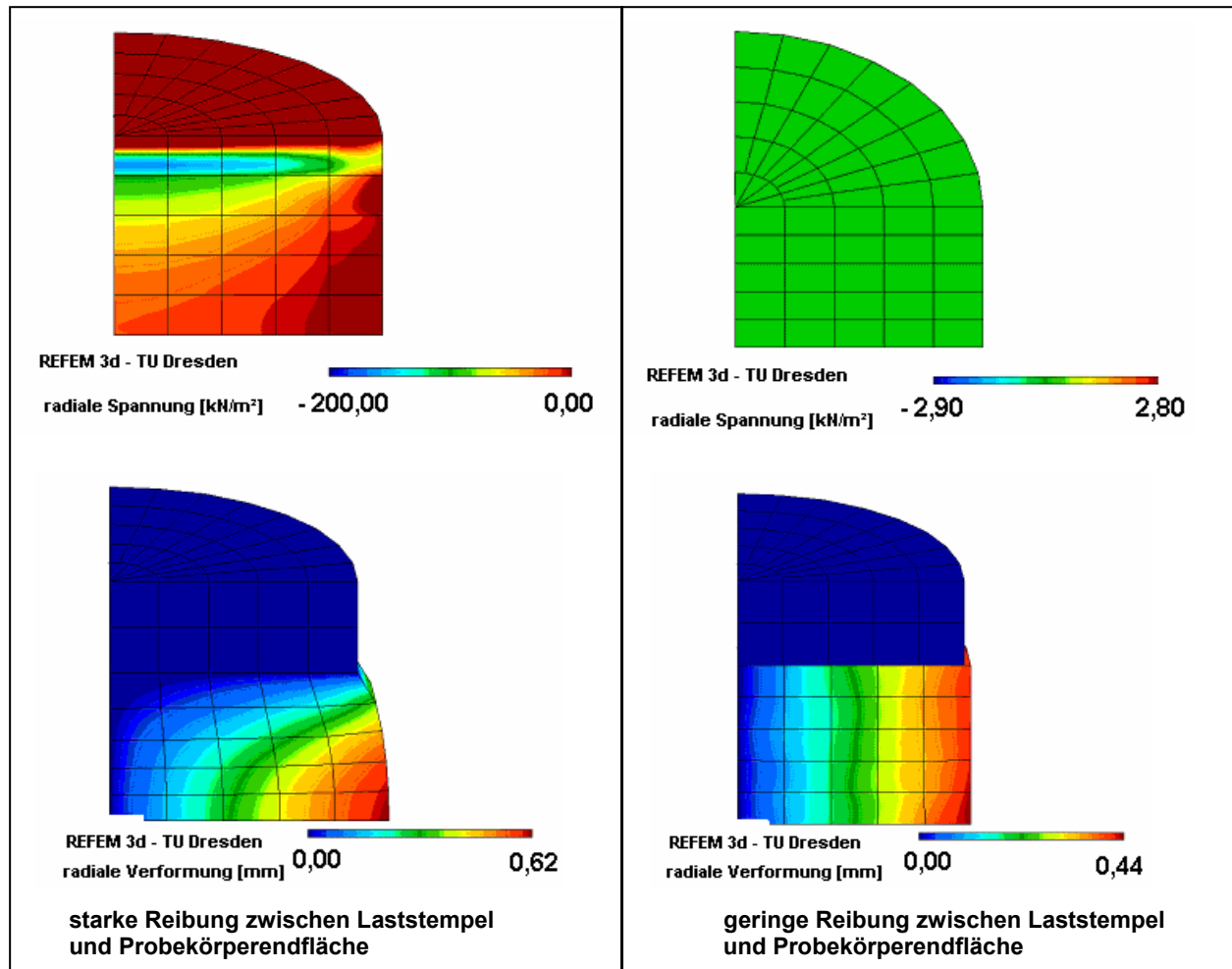


Abb. 4-3: Berechnete Spannungen und Dehnungen mit REFEM 3D

Um die Reibung zwischen Laststempel und Probekörperendfläche so gering wie möglich zu halten, ist zusätzlich zur Teflonfolie ein Gleitmittel zwischen Probekörper und Teflonfolie aufzubringen. Beide Varianten der Gleitmittel Silikonfett + Grafitflocken sowie Glycerin-Dextrin-Gemisch reduzieren die Reibung deutlich.

In dieser Arbeit wurde die Variante Glycerin-Dextrin-Gemisch + Teflonfolie für alle Druckversuche mit dynamischer Belastung ausgewählt. Zum einen reduziert das Glycerin die Reibung etwas stärker als Grafitflocken und zum anderen bedeutet die Verwendung von Grafitflocken einen erhöhten Reinigungsaufwand.

4.2.2 Einfluss des h/d-Verhältnisses auf den Verformungswiderstand

Die Höhe (Schlankheit) des Probekörpers hat einen entscheidenden Einfluss auf die im Versuch gemessene bleibende Verformung. Dies konnte bei einer Variation der Probekörperhöhe bei unverändertem Probekörperdurchmesser sowohl beim Triaxialversuch als auch beim einaxialen Druckschwellversuch festgestellt werden.

Es wurden in dem Forschungsvorhaben [Renken 2005] mit verschiedenen Asphaltarten Triaxialversuche an Bohrkernen mit einem Durchmesser von 100 mm und einer Probekörperhöhe von 60 bzw. 80 mm bei unterschiedlichen Radialspannungen in Abhängigkeit von der Asphaltart, einer axialen Spannung von 0,8 MPa bei einer Prüftemperatur von 40 °C und einer Frequenz von 10 Hz durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen eine deutliche Tendenz, siehe Abbildung 4-4.

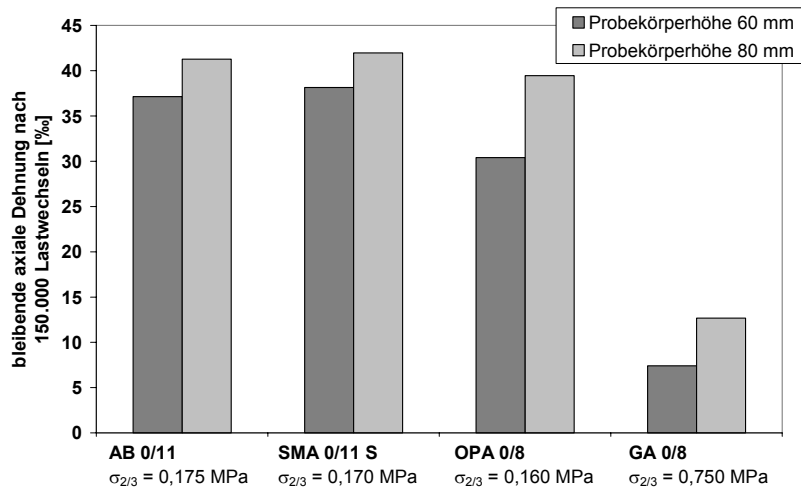


Abb. 4-4: Einfluss des h/d-Verhältnisses beim dynamischen Triaxialversuch

Bei allen untersuchten Asphaltarten wurden bei einer Probekörperhöhe von 80 mm höhere bleibende axiale Dehnungen ermittelt als bei einer Probekörperhöhe von 60 mm.

Ergebnisse aus einaxialen Druckschwellversuchen bestätigen dieses Verhalten. Geprüft wurden Probekörper der Variante SMA I mit einem Durchmesser von 100 mm und den Höhen 65 und 80 mm bei 50 °C, 10 Hz sowie axialen Belastungen von 0,3 und 0,9 MPa, siehe Abbildung 4-5.

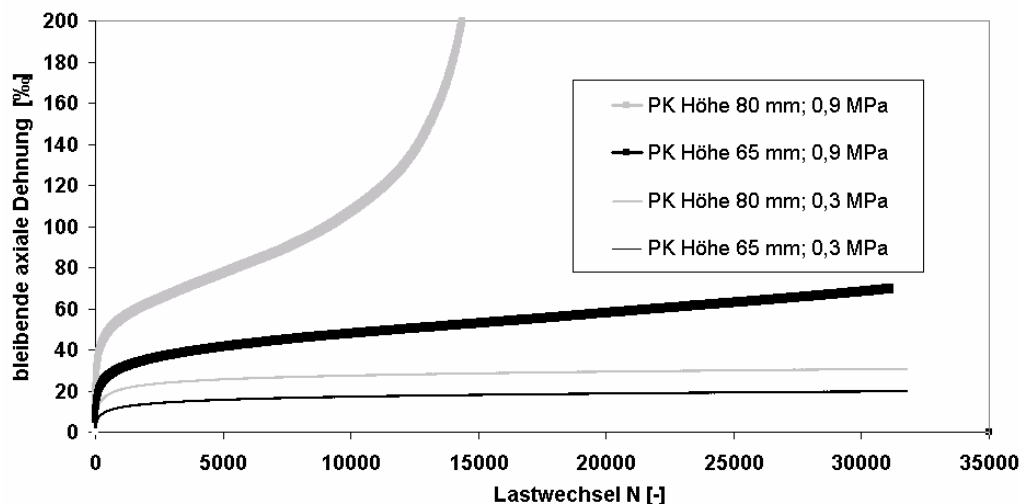


Abb. 4-5: Einfluss des h/d-Verhältnisses beim einaxialen Druckschwellversuch

Sowohl bei 0,3 als auch bei 0,9 MPa axialer Belastung weisen die Probekörper mit einer Höhe von 80 mm größere bleibende axiale Dehnungen auf als die mit 65 mm Höhe. Begründet werden kann dieses Verhalten mit folgender Betrachtung:

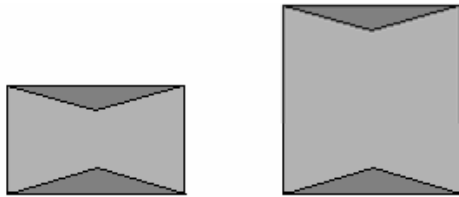


Abb. 4-6: Einfluss der Probekörperhöhe

Werden zwei belastete Probekörper mit unterschiedlicher Probekörperhöhe und gleicher Endflächenbeschichtung und Durchmesser gegenüber gestellt, wird deutlich, dass das Verhältnis vom gestützten Bereich (dunkel grau), verursacht durch die Reibung zwischen Laststempel und Probekörperendfläche, zum ungestütztem Bereich (hell grau) bei gedrunenen Probekörpern größer ist als bei hohen Probekörpern, siehe Abbildung 4-6. Je größer dieses Verhältnis ist, desto größer ist der Verformungswiderstand und somit treten bei Probekörpern mit einer geringen Höhe kleinere Verformungen auf.

Um das wirkliche Materialverhalten zu ermitteln und somit die Einflüsse der Reibung im Lasteinleitungsbereich zu eliminieren, müssen die Dehnungen im mittleren Bereich des Probekörpers, in dem ein homogener Belastungszustand herrscht, erfasst werden. Dies lässt sich mit einem entsprechenden Messsystem am Probekörper und schlanken (hohen) Probekörpern realisieren.

4.2.3 Herstellung von schlanken Asphaltprobekörpern

Die Herstellung von schlanken (hohen) Probekörpern kann auf zwei unterschiedliche Arten erfolgen. Die Probekörper können parallel oder orthogonal zur Verdichtungsrichtung aus im Labor hergestellten walzsektor-verdichteten Asphaltplatten gebohrt werden. Bei der ersten Variante, parallel zur Verdichtungsrichtung ist der Einfluss der materiellen Anisotropie in Lastrichtung auf das Verformungsverhalten zu ermitteln und entsprechend bei der Verwendung für eine analytische Berechnung zu bewerten. Für die zweite Variante, orthogonal zur Verdichtungsrichtung, ist eine Optimierung der Asphaltplattenherstellung notwendig, da es bei einer zu erzielenden Plattenhöhe von beispielsweise 120 mm und einem einlagigen Einbau zu einer inhomogenen Dichteverteilung in der Asphaltplatte kommt.

4.2.3.1 Einfluss der Bohrrichtung auf den Verformungswiderstand

Um den Einfluss der Bohrrichtung auf den Verformungswiderstand bzw. die materielle Anisotropie zu untersuchen, wurden Vergleichsuntersuchungen mit dem Triaxialversuch durchgeführt. Dazu wurden Probekörper mit einer Höhe von 65 mm und einem Durchmesser von 100 mm orthogonal und parallel zur Verdichtungsrichtung aus einer Asphaltplatte herausgebohrt. Als Mischgut wurde, wie bei den Vorversuchen zur Ermittlung des Einflusses der Reibung zwischen Laststempel und Probekörperendfläche auf die Verformung, ein nicht im Prüfumfang enthaltener Asphaltbinder 0/16 mit einem Bindemittel 50/70 eingesetzt.

Diese Probekörper wurden bei 50 °C, 10 Hz, einer Axialspannung von 0,8 MPa und einer Radialspannung von 0,08 MPa sowie mit einer noch nicht optimierten Endflächenbeschichtung (nur Teflonfolie) geprüft, siehe Abbildung 4-7.

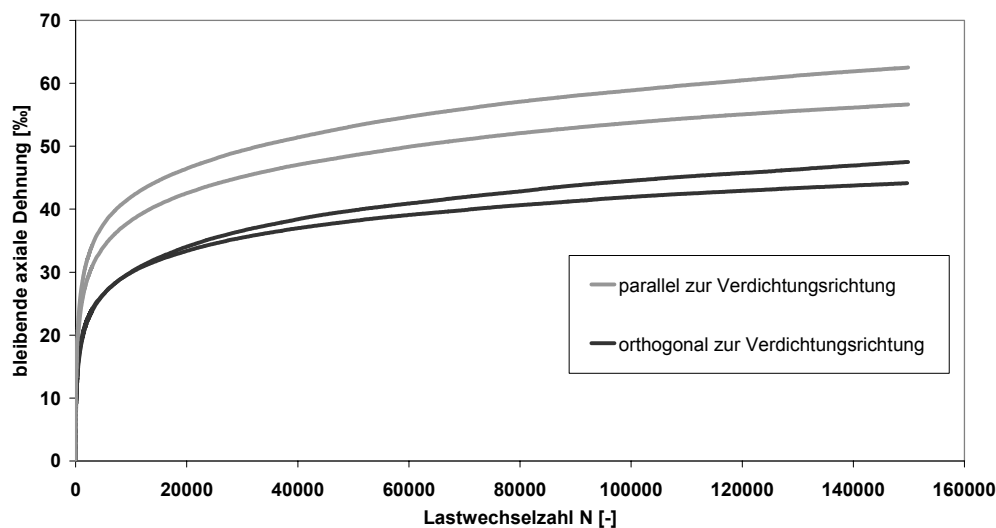


Abb. 4-7: Ergebnisse der Triaxialversuche - Anisotropie (ABi 0/16 S)

Nach Huschek stellt sich der größte Verformungswiderstand eines Asphaltes in der Richtung ein, in welcher die größte Druckspannung bei der Verdichtung erzeugt wird [Huschek 1983]. Die ermittelten Verformungskurven entsprechen dieser Aussage. Die orthogonal zur Verdichtungsrichtung gebohrten Probekörper weisen geringere bleibende axiale Dehnungen auf als die parallel zur Verdichtungsrichtung gebohrten. Huschek wies in seiner Dissertation nach, dass die untersuchten Probekörper unter isotropem Druck ein anisotropes Verformungsverhalten aufweisen. Danach befindet sich das Verhältnis von radialer Gesamtdehnung zu axialer Gesamtdehnung in einem Bereich von 1,25 bis 1,73.

Bei den im Rahmen der Vorversuche durchgeführten Untersuchungen herrschte kein isotroper Spannungszustand ($\sigma_{ax}=0,8$ MPa, $\sigma_{rad}=0,08$ MPa). Allerdings wurden die zu prüfenden Bohrkern mit unterschiedlicher Bohrrichtung der gleichen Last ausgesetzt. Das Verhältnis der bleibenden axialen Dehnung von orthogonal zur Verdichtungsrichtung gebohrten zu parallel zur Verdichtungsrichtung gebohrten Probekörpern liegt bei 1,19 bis 1,42 und schneidet den von Huschek definierten Bereich. Weiter wurden Untersuchungen zur Ermittlung der materiellen Anisotropie an dem im Prüfprogramm enthaltenen SMA I durchgeführt. Es wurden 80 mm hohe Probekörper mit einem Durchmesser von 100 mm orthogonal und parallel zur Verdichtungsrichtung herausgebohrt. Diese wurden bei 50°C, 10 Hz, einer Radialspannung von 0,4 und von 0,6 MPa sowie einer Axialspannung von 0,8 MPa und einer optimierten Endflächenbeschichtung (Glycerin-Dextrin-Gemisch plus Teflonfolie) geprüft, siehe Abbildung 4-8.

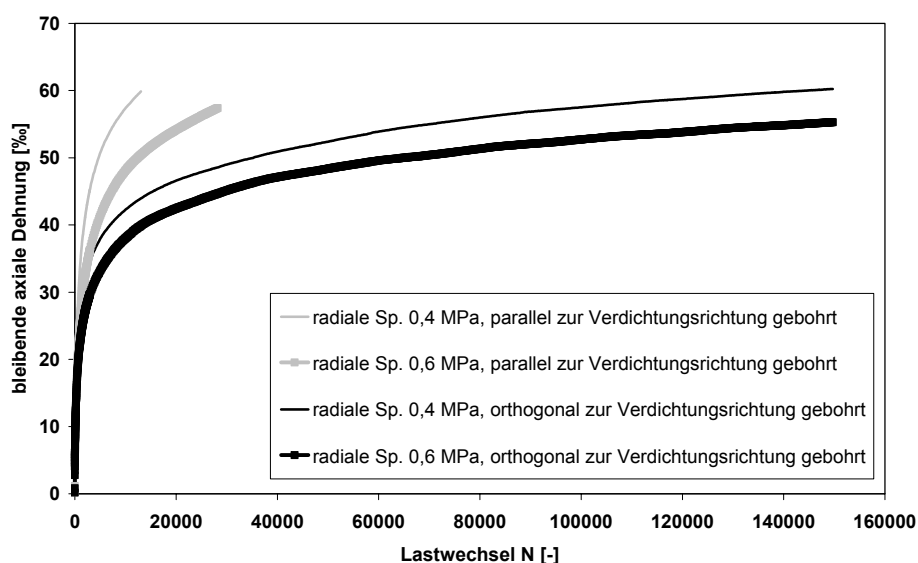


Abb. 4-8: Ergebnisse der Triaxialversuche - Anisotropie (SMA I)

Auch bei diesem Material konnte festgestellt werden, dass sich ein größerer Verformungswiderstand bei den orthogonal zur Verdichtungsrichtung gebohrten Probekörpern einstellte. Da die Hohlraumgehalte dieser Probekörper sehr gering waren ($H = 1,15$ bis $1,36$ Vol.-%) und nicht den Anforderungen der ZTV Asphalt-StB 01 entsprachen, wurden die Prüfungen wiederholt, siehe Abbildung 4-9.

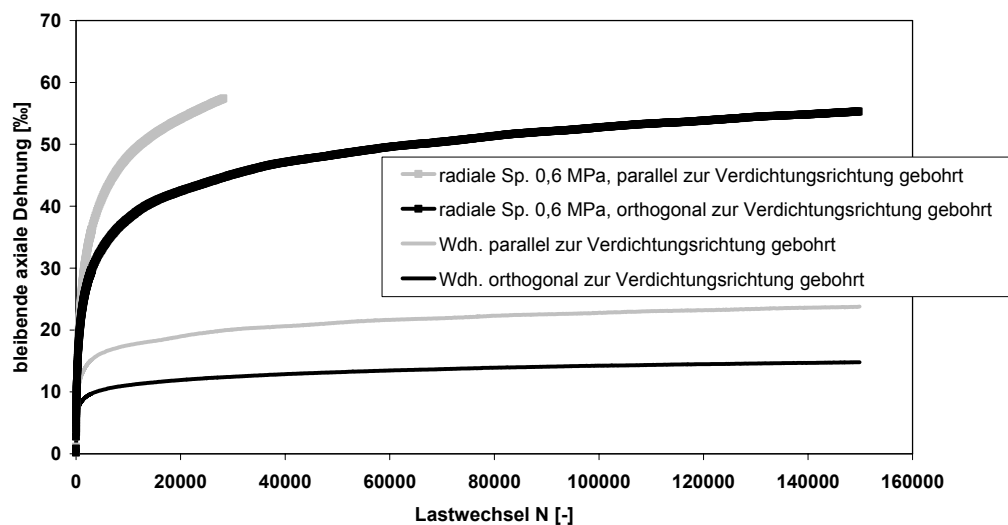


Abb. 4-9: Ergebnisse der Triaxialversuche - Anisotropie (SMA I), Einfluss Hohlraumgehalt

Durch die Einhaltung des Mindesthohlraumgehaltes nach ZTV Asphalt-StB 01 bildet sich ein in sich abgestütztes Splittgerüst aus, welches den Verformungswiderstand erhöht.

Das Verhältnis der bleibenden axialen Dehnung nach 150.000 Lastwechseln von orthogonal zu parallel zur Verdichtungsrichtung gebohrten Probekörpern liegt hier im Mittel bei 1,608 und damit in dem von Huschek beschriebenen Bereich.

Diese ermittelten Verhältnisse zur Beschreibung der materiellen Anisotropie spiegeln nur ansatzweise das wirkliche Materialverhalten wieder, da bei den untersuchten Probekörpern die Überlegungen aus Kapitel 4.1.2 aufgrund der Beschränkung der Probekörperabmessungen in der verwendeten Triaxialprüfmaschine unberücksichtigt bleiben mussten.

Aufgrund der anisotropen Verformungen bei isotroper Belastung und dem Mangel an Erfahrungen mit den mechanischen Eigenschaften von parallel zur Verdichtungsrichtung gebohrten Probekörpern, wurde die Bohrrichtung der zu prüfenden Probekörper orthogonal zur Verdichtungsrichtung ausgewählt. Die maßgebende Belastung in den Versuchen erfolgt somit wie in der tatsächlichen Straßenbefestigung orthogonal zur Verdichtungsrichtung.

4.2.3.2 Optimierung der Plattenherstellung

Für die Herstellung von hohen, orthogonal zur Verdichtungsrichtung gebohrten Probekörpern musste aufgrund der Kapazität des zur Verfügung stehenden Walzsektor-Verdichtungsgerätes die Probekörperhöhe bzw. Plattenhöhe auf 120 mm

begrenzt werden. Die Herstellung dieser hohen Asphaltplatten mit einem homogenen Verdichtungsgrad gestaltete sich zu einer komplexen Aufgabe.

Erste Versuche, mit dem AB 120 mm hohe Platten einlagig herzustellen, ergaben eine inhomogene Verdichtung. Die Platten wurden mit dem Braunschweiger Verdichtungsprogramm (weg- und kraftgeregelt) hergestellt. In der kraftgeregelten Hauptverdichtung wurden die Walzübergänge bei den ersten Versuchen auf 16 festgelegt. Der Walztisch und der Sektor wurden vor der Herstellung auf 80 °C temperiert und das Mischgut 2,5 Stunden auf 160 °C aufgeheizt, danach für 0,5 Stunden auf 137 °C temperiert.

In einem weiteren Schritt wurde die Platte zweilagig heiß auf heiß hergestellt. Die erste Lage wurde zunächst nur weggeregelt und die zweite Lage weg- und kraftgeregelt bei 16 Walzübergängen verdichtet. Um den Verdichtungsgrad zu kontrollieren, wurde die Platte in 3 Lagen und diese jeweils in 9 Blöcke geschnitten. An diesen 27 Teilstücken wurden die Raumdichten bestimmt und die Hohlraumgehalte berechnet, siehe Abbildung 4-10.

	oben			Mitte			unten		
oben	3,42	3,49	3,61	5,63	4,89	6,15	10,64	10,20	11,54
Mitte	2,96	3,48	3,08	3,16	2,33	3,23	7,89	6,39	8,49
unten	2,90	3,20	3,70	4,83	4,33	6,31	10,63	9,89	11,37

Abb. 4-10: Verteilung der Hohlraumgehalte in der Asphaltplatte

Nach der ZTV Asphalt-StB 01 werden für einen Asphaltbeton 0/11S Hohlraumgehalte am Marshall-Probekörper von 3,0 – 5,0 Vol.-% und für die eingebaute Schicht $\leq 7,0$ Vol. % vorgegeben. Die rot hinterlegten Kästchen überschreiten die Vorgabe des zulässigen Hohlraumgehaltes für die eingebaute Schicht.

Im nächsten Optimierungsschritt wurden beide Lagen kraft- und weggeregelt verdichtet - die erste Lage mit 8 und die zweite Lage mit 16 Überrollungen.

Da die Randbereiche einen entscheidenden Einfluss auf die Raumdichte ausüben, wurden zur Überprüfung zwei Kerne aus dem mittleren Bereich der Platte gebohrt und diese in drei Lagen unterteilt, siehe Abbildung 4-11.

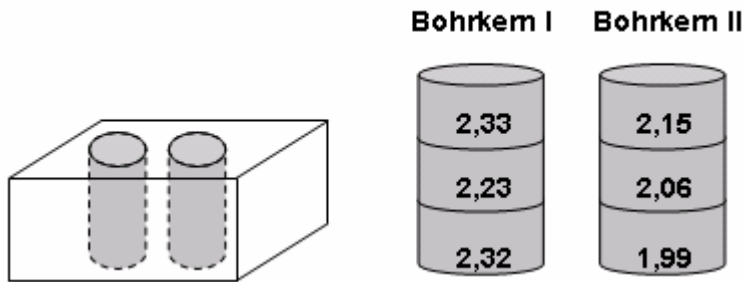


Abb. 4-11: Bohrkernentnahme aus der Asphaltplatte

An den Hohlraumgehalten, die allerdings noch zu gering sind, ist zu erkennen, dass 120 mm hohe Probekörper annähernd homogen verdichtet hergestellt werden können.

Um den Einfluss der Schichtgrenze bei einem zweilagigen Einbau im mittleren Messbereich des Probekörpers zu eliminieren, wurden die Platten in drei Lagen heiß auf heiß hergestellt. Die unterste Lage sollte nach der Verdichtung eine Höhe von 30 mm, die mittlere Lage von 60 mm und die oberste Lage von 30 mm erreichen. Für diesen Optimierungsschritt wurde der SMA II verwendet. Das Verdichtungsprogramm setzte sich wie folgt zusammen:

1. Lage weg- und kraftgeregelt (6 Übergänge)
2. Lage weg- und kraftgeregelt (10 Übergänge)
3. Lage weg- und kraftgeregelt (12 Übergänge)

Es wurden wieder zwei Bohrkerns gezogen. Der eine Bohrkern wurde bei der Bundesanstalt für Straßenwesen durchstrahlt und zeigte folgende Dichteverteilung:

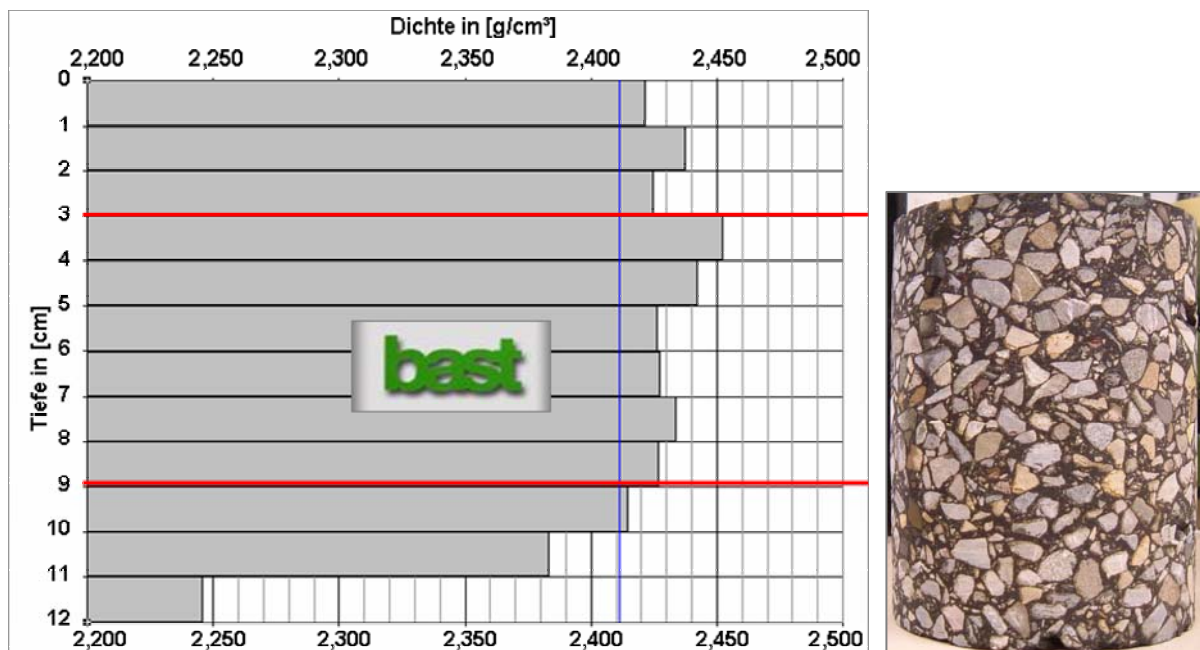


Abb. 4-12: Ergebnisse der Durchstrahlung des Asphaltprobekörpers

Anhand des Dichteprofiles sind keine eindeutigen Schichtgrenzen in dem rot markierten Messbereich zu erkennen.

Trotz des annähernd homogen verdichteten Bohrkernes wurde die Herstellung weiter optimiert, da der Hohlraumgehalt, der am zweiten Bohrkern an vier 30 mm dicken Scheiben bestimmt wurde, zu gering war (Tabelle 4-1, 1.Versuch).

Tabelle 4-1: Raumdichte und Hohlraumgehalt der Asphaltbohrkernscheiben

	1. Versuch (6, 10, 12) Walzübergänge : 6, 10, 12		2. Versuch (6, 8, 8) Walzübergänge : 6, 8, 8		3. Versuch (6, 6, 10) Walzübergänge : 6, 6, 10	
	H _{bit} [Vol.-%]	ρ _A [g/cm³]	H _{bit} [Vol.-%]	ρ _A [g/cm³]	H _{bit} [Vol.-%]	ρ _A [g/cm³]
1. Scheibe oben	2,95	2,357	4,20	2,327	3,73	2,338
2. Scheibe Mitte	1,04	2,404	2,10	2,378	2,37	2,371
3. Scheibe Mitte	1,05	2,404	2,36	2,372	2,25	2,374
4. Scheibe unten	1,00	2,405	2,28	2,374	2,31	2,373

Beim zweiten und dritten Optimierungsversuch mit dem SMA II wurden die Walzübergänge variiert. Auch mit diesem Asphalt konnte eine annähernd homogen verdichtete Platte hergestellt werden.

4.2.4 Messsystem am Probekörper

Im Rahmen der Vorversuche sollte ein einfach anwendbares Messsystem entwickelt werden, welches die Verformungen nicht über die gesamte Probekörperhöhe, sondern im mittleren Bereich des Probekörpers erfasst, um die Einflüsse der Reibung zwischen Laststempel und Probekörperendfläche bei der Verformungsmessung zu eliminieren.

Bei den Triaxialversuchen mit der Braunschweiger Triaxialprüfmaschine gestaltet sich die Umsetzung eines solchen Messsystems als schwierig, da die Bedingung zum Erreichen eines homogenen Belastungszustandes im Probekörper ($h/d = 1,25 - 2$) nicht erfüllt werden kann. Diese Triaxialprüfmaschine ist für Probekörper bis zu einer Höhe von 80 mm und einem Durchmesser von 100 mm konzipiert. Ein homogener Belastungszustand kann demnach nicht erreicht werden. Allerdings kann durch eine geeignete Endflächenbeschichtung der Probekörper die Reibung zwischen Laststempel und Probekörperendfläche und damit die Größe der Spannungen mit stützender Wirkung im Lasteinleitungsbereich minimiert werden.

Der einaxiale Druckschwellversuch eignet sich dagegen aufgrund der geringen Komplexität des Prüfverfahrens hervorragend zur Entwicklung eines Messsystems

am Probekörper. Die Verformungen sollen nicht wie bisher an der Traverse, siehe Abbildung 4-13 rechts, sondern direkt am Probekörper gemessen werden. Dazu wurden die induktiven Wegaufnehmer in Haltevorrichtungen mittels eines Zwei-Komponentenklebers am Probekörper befestigt, siehe Abbildung 4-13 links.



Abb. 4-13: links & Mitte: DSV mit Messsystem am Probekörper, rechts: DSV mit Messsystem an der Traverse

Die Probekörperhöhe wurde auf 120 mm und der Messbereich am Probekörper auf 60 mm festgelegt. Um Einflüsse der materiellen Anisotropie zu eliminieren, wurden die Probekörper orthogonal zur Verdichtungsrichtung gebohrt.

Mit dem neuen Messsystem wurden einaxiale Druckschwellversuche bei 30 °C, 10 bzw. 5 Hz und verschiedenen axialen Spannungen am optimiert verdichteten SMA II durchgeführt. Es ist sowohl der Lasteinfluss als auch der Frequenzeinfluss bei der bleibenden axialen Dehnung zu erkennen, siehe Abbildung 4-14.

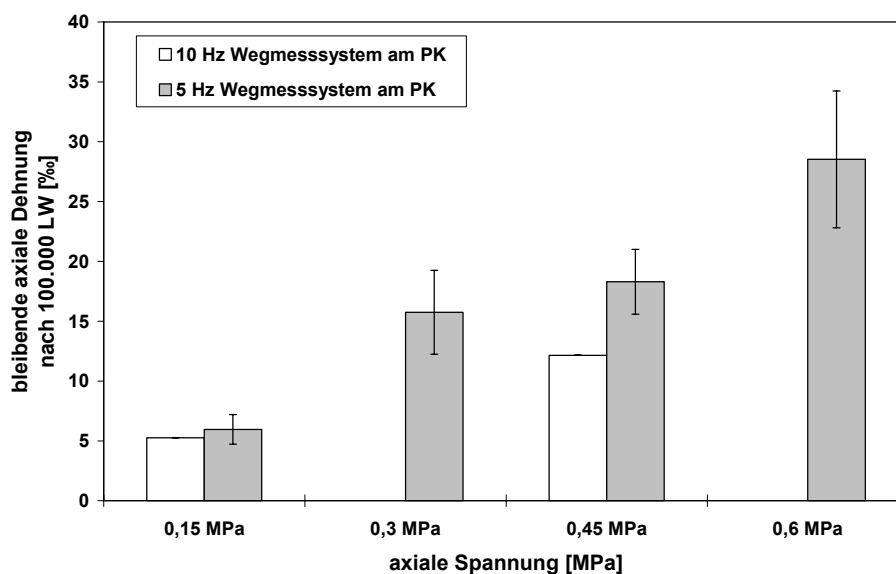


Abb. 4-14: Ergebnisse der Untersuchungen an 120 mm hohen Probekörpern – bleibende axiale Dehnung

Die Breite der Streuung wurde bei Mehrfachbelegung der Versuche angegeben. Die elastischen axialen Dehnungen nehmen wie bei der bleibenden axialen Dehnung mit zunehmender axialer Spannung zu, siehe Abbildung 4-15.

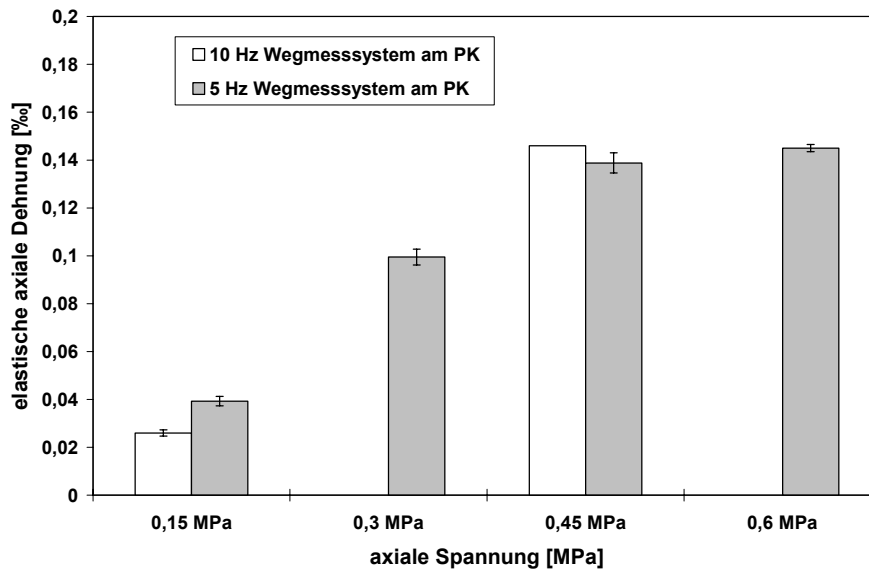


Abb. 4-15: Ergebnisse der Untersuchungen an 120 mm hohen Probekörpern – elastische axiale Dehnung

Im Vergleich zu diesen Ergebnissen sind die gleichzeitig gemessenen Verformungen an denselben Probekörpern über die gesamte Probekörperhöhe von großem Interesse, um den Einfluss der stützenden Wirkung der im Lasteinleitungsbereich erzeugten Spannungen auf das Verformungsverhalten zu ermitteln. Für diese gleichzeitige Erfassung der Verformung ist allerdings eine Umrüstung der zur Verfügung stehenden Prüfeinrichtung notwendig, Erweiterung der Messkanäle, die im Rahmen dieser Arbeit nicht realisiert werden konnte.

Bei Versuchen mit einer Prüftemperatur von 50 °C wirkten an den Klebeflächen der Halterungen für die Wegaufnehmer so große Scherkräfte, dass es zum Herausbrechen des Asphaltmischgutes kam. Daraufhin wurden die Klebeflächen durch die Anordnung von Winkeln vergrößert, um die Scherkräfte zu minimieren, siehe Abbildung 4-16.



Abb. 4-16: Optimierung der Anbringung des Messsystems am Probekörper

Im Weiteren wurde überprüft, ob das Gewicht der Induktiven Wegaufnehmer einen Einfluss auf die Neigung der angeklebten Winkel über die Zeit hat. Dazu wurde eine Messung mit diesem Verfahren an einem unbelasteten Probekörper durchgeführt.

Da die Datenaufnahme an diesem Probekörper nur im laufenden Betrieb der Prüfmaschine möglich ist, wurde ein zweiter Probekörper belastet, siehe Abbildung 4-17.

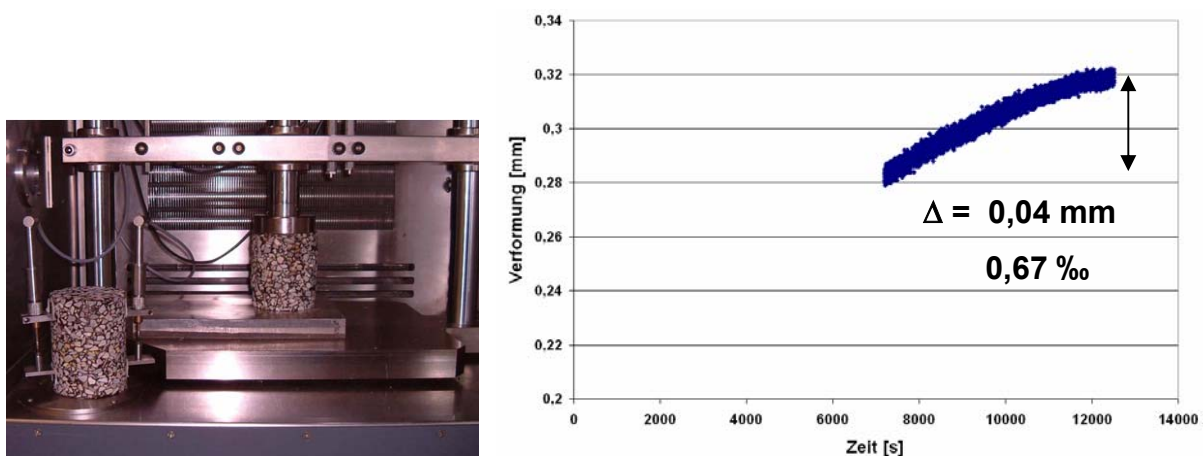


Abb. 4-17: Überprüfung der Veränderung der Neigung angeklebter Winkel

Um Volumendehnungen in der Temperierphase auszuschließen, wurden die Verformungen erst nach 7.200 Sekunden aufgezeichnet. Durch das Gewicht der Wegaufnehmer und durch den niedrigen Elastizitätsmodul des Asphaltes bei 50 °C kam es zu einer Veränderung der Neigung der angeklebten Winkel.

Eine weitere Optimierung des einfachen Wegmesssystems am Probekörper besteht darin, das Gewicht der Wegaufnehmer über parallel zu dem Probekörper angeordnete Stative aufzunehmen, siehe Abbildung 4-18.

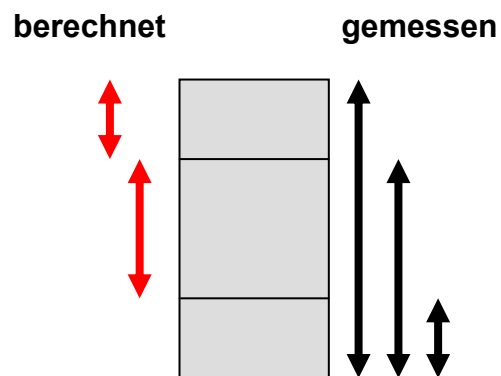
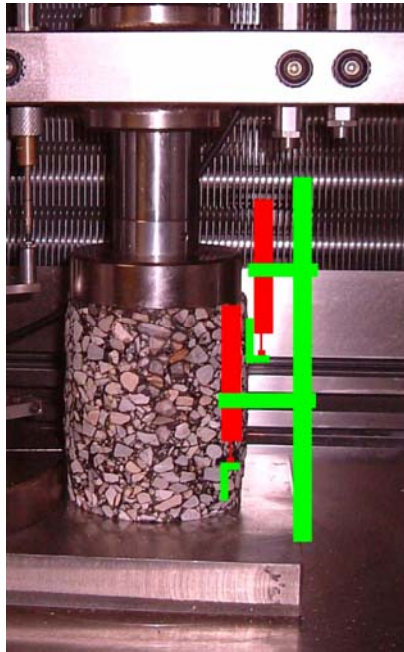


Abb. 4-18: Optimierung des Wegmesssystems am Probekörper

Bei diesem Lösungsansatz werden um 180° versetzt jeweils zwei induktive Wegaufnehmer angeordnet und an Stativen befestigt, die mit der Prüfeinrichtung verbunden sind. Ein Wegaufnehmer erfasst die Verformungen im unteren Bereich des Probekörpers und der zweite die Verformungen im unteren und mittleren Bereich. Die Gesamtverformung wird über einen im Belastungskolben enthaltenen Wegaufnehmer aufgenommen. Die Verformungen in den Lasteinleitungsbereichen, die infolge der Reibung zwischen Laststempel und Probekörperendfläche beeinflusst werden, sowie die Verformungen im mittleren Probekörperbereich können aus den gemessenen berechnet und somit differenziert betrachtet werden.

Diese Variante konnte nicht realisiert werden, da hierfür drei Messkanäle benötigt werden und dies eine größere Umrüstung der dynamischen Prüfmaschine bedeuten würde, die zeitnah noch nicht umgesetzt werden konnte.

Weitere Lösungsansätze für eine Messmethode am Probekörper stellen Extensometer dar, siehe Abbildung 4-19.

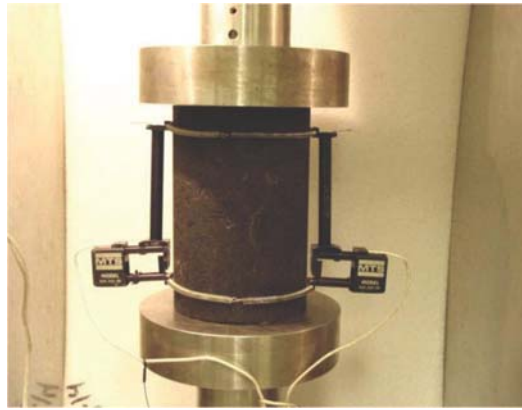


Abb. 4-19: Weitere Lösungsmöglichkeiten für ein Messsystem am Probekörper
[Wellner, Leutner 2007; Clyne 2003]

Durch das geringe Gewicht und den direkten Kontakt mit dem Probekörper ist diese Messmethode in der Lage die Verformungen im mittleren Bereich des Probekörpers gezielt zu erfassen.

Auch photogrammetrische Messsysteme stellen für die Verformungsmessung am Asphaltprobekörper eine Lösungsmöglichkeit dar. Über entsprechende Messpunkte am Probekörper können die Deformationen auch bei hohen Prüffrequenzen erfasst werden, siehe Erfahrungen aus der Automobilbranche. Ergebnisse mit dieser Messmethode an Asphaltprobekörpern wurden bisher nicht veröffentlicht.

In dieser Arbeit standen für die einaxialen Druckschwellversuche diese Messverfahren nicht zur Verfügung. Die vorab erläuterten Anmerkungen geben somit nur einen Ausblick für mögliche Messsysteme am Probekörper.

4.3 ELASTISCHE UND VISKOELASTISCHE VERFORMUNGEN

Bei Prüfverfahren mit sinusförmiger Druckschwellbelastung wird die gemessene bleibende Dehnung (Impulskriechkurve) von einer sinusförmig schwingenden Dehnungsreaktion überlagert.

Die Amplitude dieser schwingenden Dehnungsreaktion setzt sich aus einem elastischen und einem viskoelastischen Anteil zusammen, der entsprechend Kapitel 3.1.1.5 vereinfacht für diese Arbeit als elastisch definiert ist. Die Größe der Amplitude und die Phasenverschiebung der Dehnung zu der aufgebrachten Spannung bilden die Grundlage der Auswertung des elastischen und viskoelastischen Verformungsverhaltens. Mit dieser Datengrundlage können der absolute Elastizitätsmodul und der Phasenwinkel als Materialkennwerte berechnet werden.

Voraussetzung für die Bestimmung von Materialkennwerten ist eine homogene Spannungsverteilung im zu prüfenden Probekörper während des Versuchs. Bei den einaxialen Druckschwellversuchen und Triaxialversuchen wird diese Bedingung bedingt erfüllt (siehe Kapitel 4.2.1, 4.2.2). Aufgrund der nicht vollflächig belasteten Probekörperoberfläche beim dynamischen Stempeleindringversuch und der dadurch inhomogenen Spannungsverteilung im Probekörper eignet sich dieser Versuch nicht zur Bestimmung von Materialkennwerten. Um dies bei der Auswertung kenntlich zu machen und dennoch das mit dem dynamischen Stempeleindringversuch ermittelte elastische Verhalten mit einer Größe beschreiben zu können, wird der Modul in dieser Arbeit nicht wie bei den beiden geeigneten Prüfverfahren als absoluter Elastizitätsmodul sondern als Steifemodul (siehe Kapitel 3.1.1.6) bezeichnet.

Im Folgenden wird das mit den verschiedenen Prüfverfahren ermittelte elastische Verformungsverhalten der im Prüfumfang enthaltenen Asphaltvarianten dargestellt. Zuvor folgt - im Gegensatz zur experimentellen - eine rechnerische Bestimmung des elastischen Verformungsverhaltens aus konventionellen Mischgut- und Bindemittel-daten.

4.3.1 Absolute Elastizitätsmoduln nach Francken und Verstraeten

Mit den in Kapitel 3.1.2.2 aufgeführten Gleichungen wurden die verschiedenen Volumenanteile und der Glasmodul der untersuchten Asphaltvarianten nach Francken und Verstraeten [Francken 1974] berechnet, siehe Tabelle 4-2.

Tabelle 4-2: Berechnete Volumenanteile und Glasmodul der untersuchten Asphaltvarianten

Asphaltvariante	Gesteinsvolumen V_g [Vol.-%]	Bindemittelvolumen V_b [Vol.-%]	Hohlraumvolumen V_a [Vol.-%]	Glasmodul E_∞ [MPa]
AB	83,1	13,9	3,0	32.225
SMA I	81,6	14,7	3,7	29.697
SMA II	82,3	13,7	4,0	30.477
OPA	64,1	10,6	25,3	8.820
ABi	82,0	14,1	3,9	30.114
ATS	80,8	14,1	5,1	27.855

Zur Ermittlung des Reduktionsfaktors R , der bei Versuchen mit dynamischer Belastung von der Nadelpenetration Pen bei 25 °C, der Temperatur T_{RK} des Erweichungspunktes „Ring und Kugel“, der Temperatur T und der Belastungsfrequenz f abhängig ist, wurden die Nomogramme von Hürtgen angewandt [Hürtgen 1982]. Da die Nomogramme für einen Penetrationsindex von 0 gelten, ist der Wert für den Erweichungspunkt „Ring und Kugel“ für die Anwendung der Nomogramme nicht relevant.

Die ermittelten Reduktionsfaktoren für die polymermodifizierten Bindemittel PmB 45 A und PmB H sind mit Vorbehalt zu verwenden, da die von Hürtgen aufgestellten Diagramme zum damaligen Zeitpunkt nur für normale Straßenbaubitumen und nicht für polymermodifizierte aufgestellt wurden.

Der Verlauf des Reduktionsfaktors R bei 10 Hz ist über die Temperatur in der Abbildung 4-20 für die verschiedenen Bindemittel dargestellt.

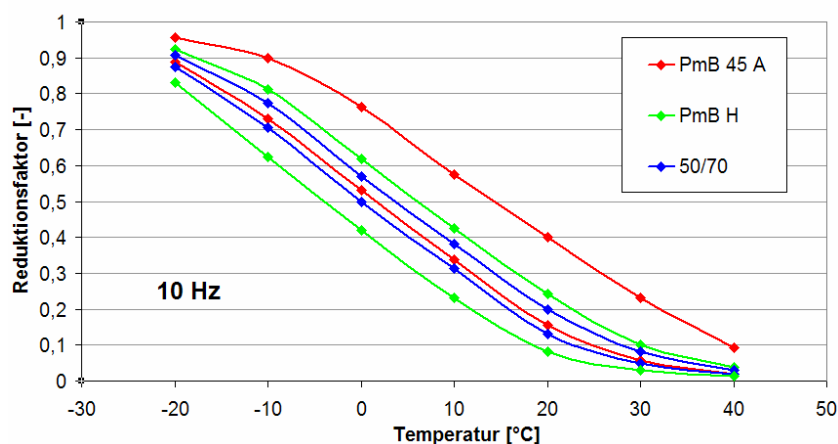


Abb. 4-20: Grenzbereiche der Reduktionsfaktoren bei 10 Hz – PmB 45A, PmB H, 50/70

Aufgrund der Spannweite der mit der Nadelpenetration bei 25 °C ermittelten Werte (PmB 45 A: 20 – 60 1/10 mm) wurden je Bindemittelvariante eine obere und untere

Grenzlinie bestimmt. Diese eingegrenzten Bereiche bilden die Wertebereiche der Reduktionsfaktoren für die jeweiligen Bindemittel.

Die Reduktionsfaktoren der untersuchten Bindemittel bei 5 Hz und 20 Hz sind dem Anhang H zu entnehmen.

Mit den Größen Glasmodul und Reduktionsfaktor der unterschiedlichen Mischgutvarianten, lassen sich die absoluten Elastizitätsmoduln mit der Gleichung 3-2 berechnen, siehe Abbildung 4-21.

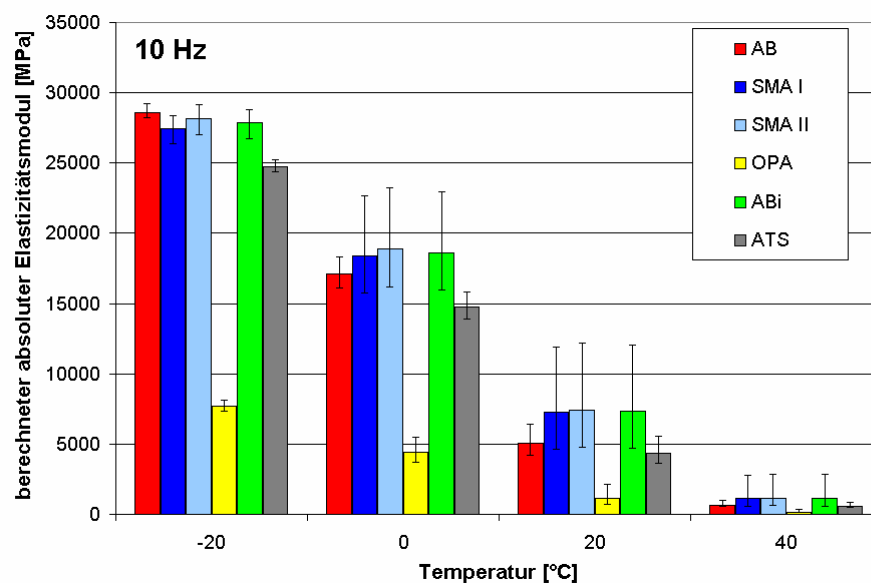


Abb. 4-21: Absolute Elastizitätsmoduln nach Francken und Verstraeten

Mit abnehmender Temperatur steigen die Werte der absoluten Elastizitätsmoduln. Bei der offenporigen Asphaltvariante werden bei allen aufgeführten Temperaturen die kleinsten Werte festgestellt. Für die Asphalttragschicht- und Asphaltbetonvariante lassen sich höhere absolute Elastizitätsmoduln nach Francken und Verstraeten berechnen. Die Moduln der beiden Splittmastixvarianten und des Asphaltbinders weisen die höchsten Werte auf und unterscheiden sich nur gering voneinander. Diese Tendenzen konnten bei den Frequenzen 5 und 20 Hz ebenfalls festgestellt werden, siehe Anhang H.

Der Frequenzeinfluss auf den absoluten Elastizitätsmodul wird in der Abbildung 4-22 deutlich.

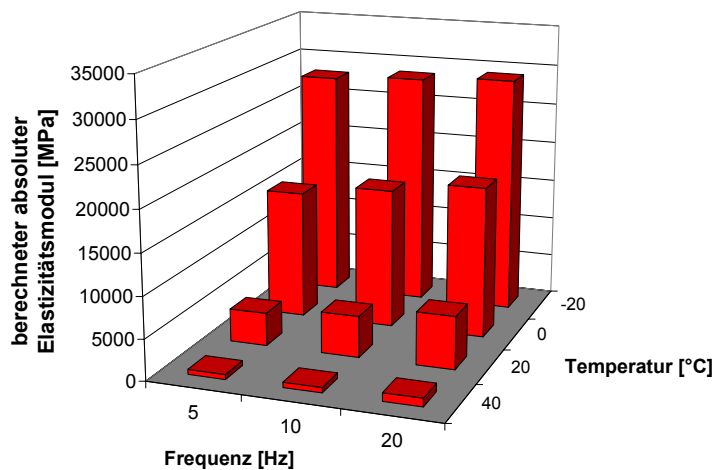


Abb. 4-22: Absolute Elastizitätsmoduln nach Francken und Verstraeten bei unterschiedlichen Frequenzen und Temperaturen – AB 0/11S

Mit zunehmender Frequenz steigen die berechneten Werte für den absoluten Elastizitätsmodul. Diese Säulendiagramme sind zur Veranschaulichung der Werte und Einflüsse aus Temperatur und Frequenz gut geeignet.

Für die Beschreibung des Materialverhaltens zur späteren Verwendung für Rechenmodelle werden jedoch funktionale Zusammenhänge benötigt. Die Temperatur-Frequenz-Äquivalenz (siehe Kapitel 3.1.2.3) lässt sich durch Masterkurven beschreiben, die z.B. mit Hilfe der vorher berechneten absoluten Elastizitätsmoduln aufgestellt werden können, siehe Abbildung 4-23.

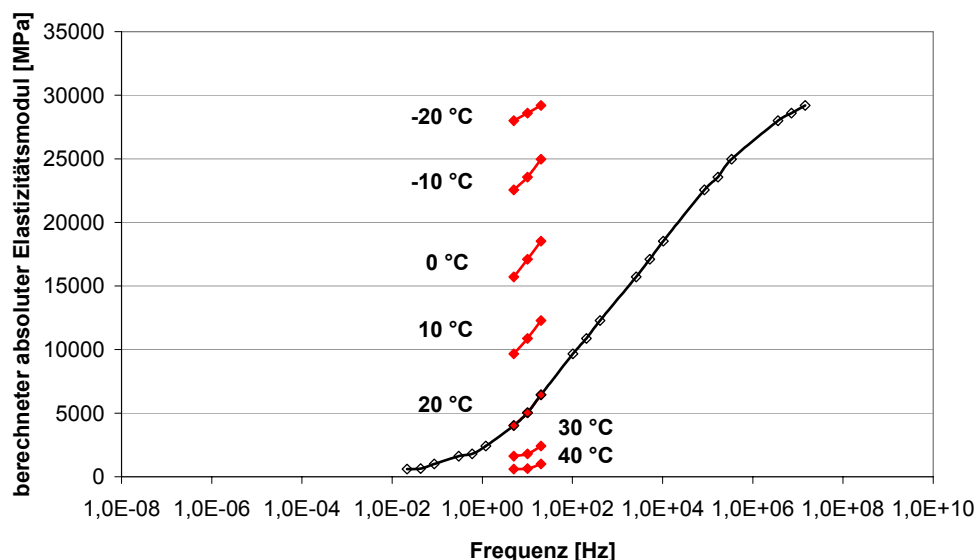


Abb. 4-23: Masterkurve – AB 0/11S

Durch Horizontalverschiebungen der absoluten Elastizitätsmoduln mit der Gleichung 3-7 kann das Materialverhalten bei unterschiedlichen Temperaturen und

Frequenzen mittels einer Masterkurve, in diesem Beispiel der 20 °C-Kurve, beschrieben werden.

Bei den berechneten Werten für den absoluten Elastizitätsmodul nach Francken und Verstraeten handelt es sich um Näherungswerte, denn Einflussfaktoren wie z.B. die Kornform, die Gesteinsart sowie die Polymermodifizierung der Bindemittel werden bei der Berechnung nicht berücksichtigt.

4.3.2 Einaxialer Druckschwellversuch - elastische und viskoelastische Kennwerte

Neben der bleibenden axialen Dehnung werden sowohl der Phasenwinkel als auch die elastische axiale Dehnung je Lastwechsel erfasst, siehe Abbildung 4-24.

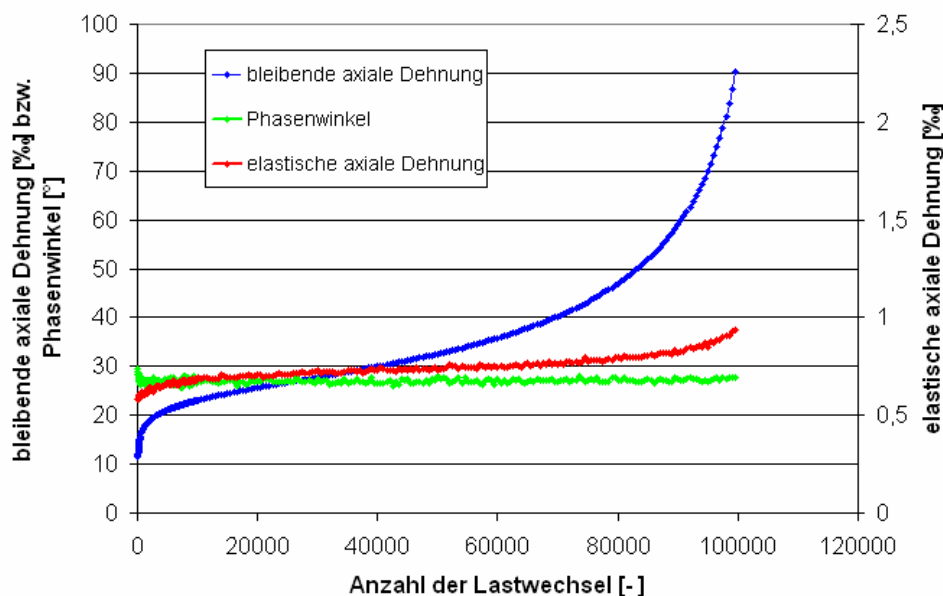


Abb. 4-24: Auswertegrößen – einaxialer Druckschwellversuch

In den ersten beiden, für die Bestimmung des Materialverhaltens relevanten Phasen der bleibenden axialen Dehnungskurve (siehe Kapitel 3.2.2.1) verlaufen die Messkurven für den Phasenwinkel und die elastische axiale Dehnung annähernd konstant. Als repräsentative Werte für den Phasenwinkel und der elastischen axialen Dehnung werden Mittelwerte dieser Messgrößen in den konstant verlaufenden Bereichen berechnet.

4.3.2.1 Absoluter Elastizitätsmodul - DSV

Der absolute Elastizitätsmodul berechnet sich nach Gleichung 3-1 als Quotient der aufgebrauchten Spannungsamplitude und der resultierenden Dehnungsamplitude

bzw. als Quotient des oberen Schwellwertes der aufgebrachten Spannung und des oberen Schwellwertes der elastischen Dehnung.

In der folgenden Abbildung sind die elastischen axialen Dehnungen, die an den 80 mm hohen Bohrkernen über die gesamte Probekörperhöhe ermittelt wurden sowie die berechneten absoluten Elastizitätsmoduln der Asphaltbetonvariante dargestellt.

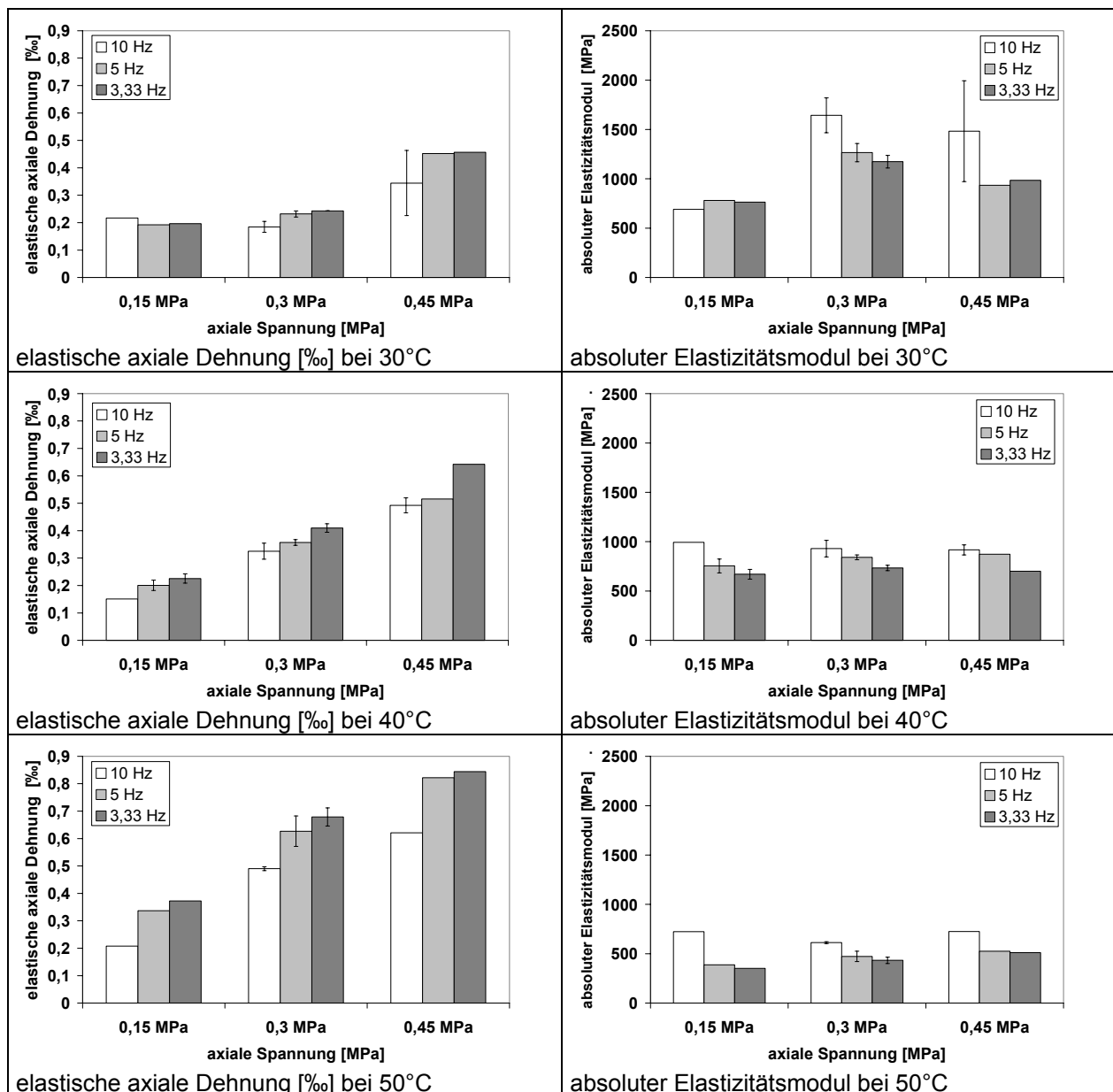


Abb. 4-25: Vergleich der elastischen axialen Dehnungen und absoluten Elastizitätsmoduln – DSV (AB)

Mit Zunahme der Prüftemperatur, Oberspannung und Belastungszeit nehmen die elastischen axialen Dehnungen unterschiedlich stark zu. Bei der Prüfkombination 30°C und 0,15 MPa bzw. 0,3 MPa ist der Einfluss der Belastung auf die elastischen

axialen Dehnungen sehr gering. Dies führt bei der vergleichenden Betrachtung der absoluten Elastizitätsmoduln zu einer unverhältnismäßigen Abstufung der Werte.

Ein Einfluss der axialen Belastung auf den absoluten Elastizitätsmodul ist bei den Ergebnissen bei 40 und 50 °C kaum zu erkennen. Im Gegensatz dazu wirkt sich der Frequenzeinfluss deutlich aus. Mit Zunahme der Frequenz steigt der absolute Elastizitätsmodul.

Die ermittelten absoluten Elastizitätsmoduln für die weiteren im Prüfumfang enthaltenen Asphalte zeigen tendenziell gleiche Anhängigkeiten von den Belastungsgrößen und sind dem Anhang B zu entnehmen.

Ein Vergleich der absoluten Elastizitätsmoduln aller untersuchten Asphalte - ermittelt mit dem einaxialen Druckschwellversuch bei 0,3 MPa Oberspannung, den verschiedenen Frequenzen und Temperaturen - zeigt, dass die Asphalttragschichtvariante die größte Steifigkeit besitzt, siehe Abbildung 4-26. Die beiden Splittmastixvarianten und der Asphaltbinder unterscheiden sich nur gering voneinander. Die Asphaltbetonvariante erreicht ähnlich hohe Werte wie die Asphalttragschichtvariante bei einer Frequenz von 10 Hz.

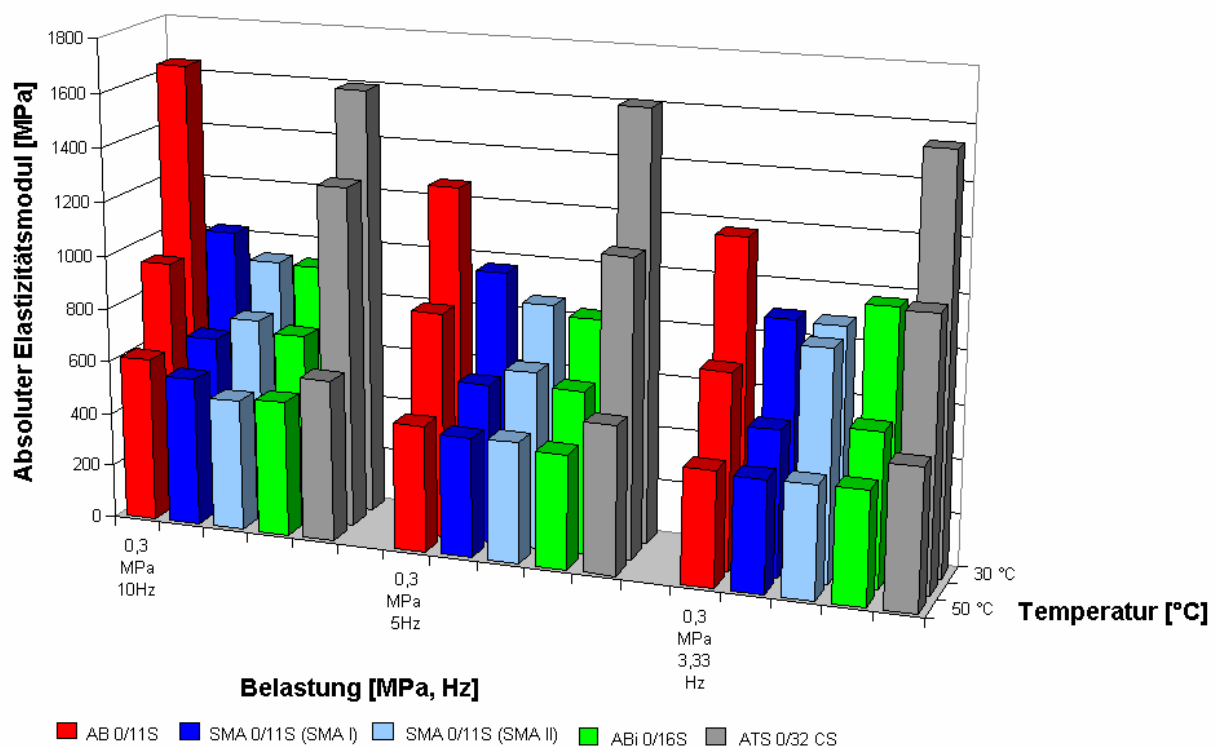


Abb. 4-26: Vergleich der absoluten Elastizitätsmoduln verschiedener Asphaltvarianten - DSV

Die einaxialen Druckschwellversuche an der offenporigen Asphaltvariante wurden aus den in Kapitel 3.2.2.1 beschriebenen Gründen nicht durchgeführt.

Es wurden für die in Abbildung 4-26 dargestellten Größen funktionale Abhängigkeiten mit hohen Bestimmtheitsmaßen gefunden, siehe Abbildung 4-27. Diese Abhängigkeiten ermöglichen die Interpolation von absoluten Elastizitätsmoduln innerhalb des geprüften Beanspruchungsbereiches und minimieren dadurch den Prüfaufwand. Die gefundenen Abhängigkeiten beschreiben das Materialverhalten im homogenen Spannungszustand. Sie sind somit für die zu entwickelnden Stoffmodelle maßgebende Eingangsgrößen.

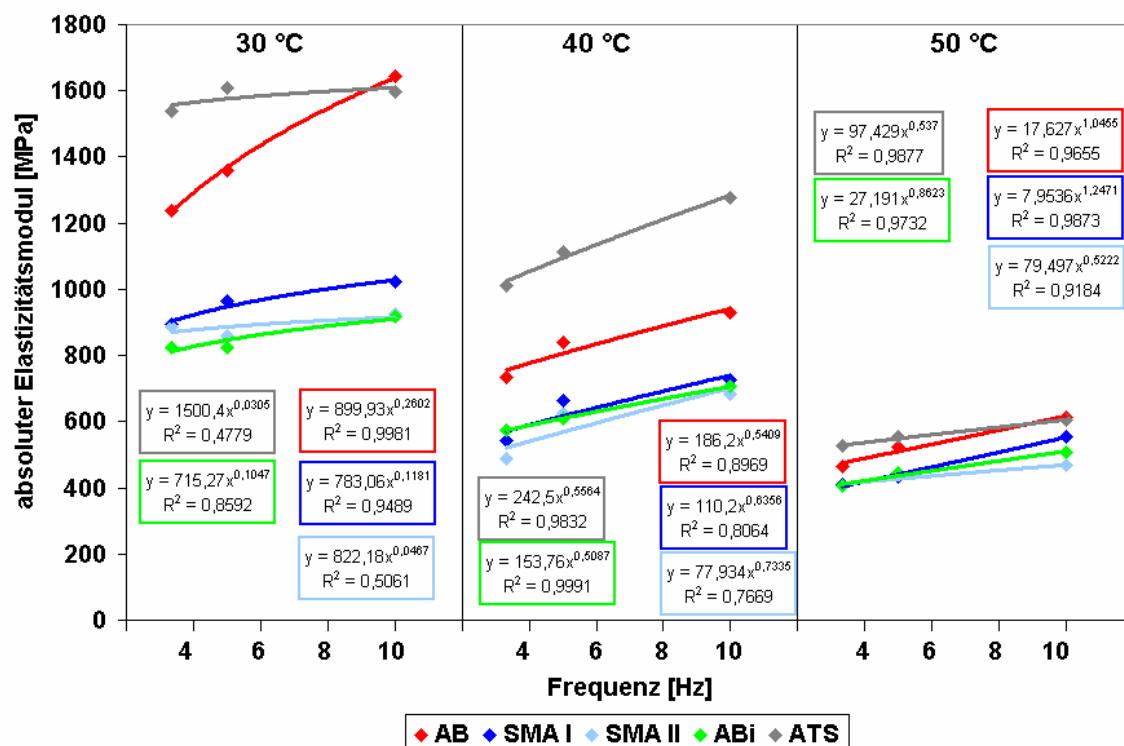


Abb. 4-27: Absolute Elastizitätsmoduln in Abhängigkeit von der Frequenz – DSV (AB, $\sigma_1=0,3$ MPa)

4.3.2.2 Phasenwinkel - DSV

Im Gegensatz zu der in Kapitel 3.1.3 beschriebenen Verhaltensweise von Bitumen, bei der mit Zunahme der Frequenz der Phasenwinkel kleiner wird, konnte diese bei den Ergebnissen der Druckschwellversuche nicht festgestellt werden.

Es wurde mit Zunahme der Frequenz eine gleichzeitige Zunahme des Phasenwinkels gemessen. In der folgenden Abbildung sind die an der Asphaltbindervariante ermittelten Phasenwinkel bei allen untersuchten Prüftemperaturen und Oberspannungen dargestellt.

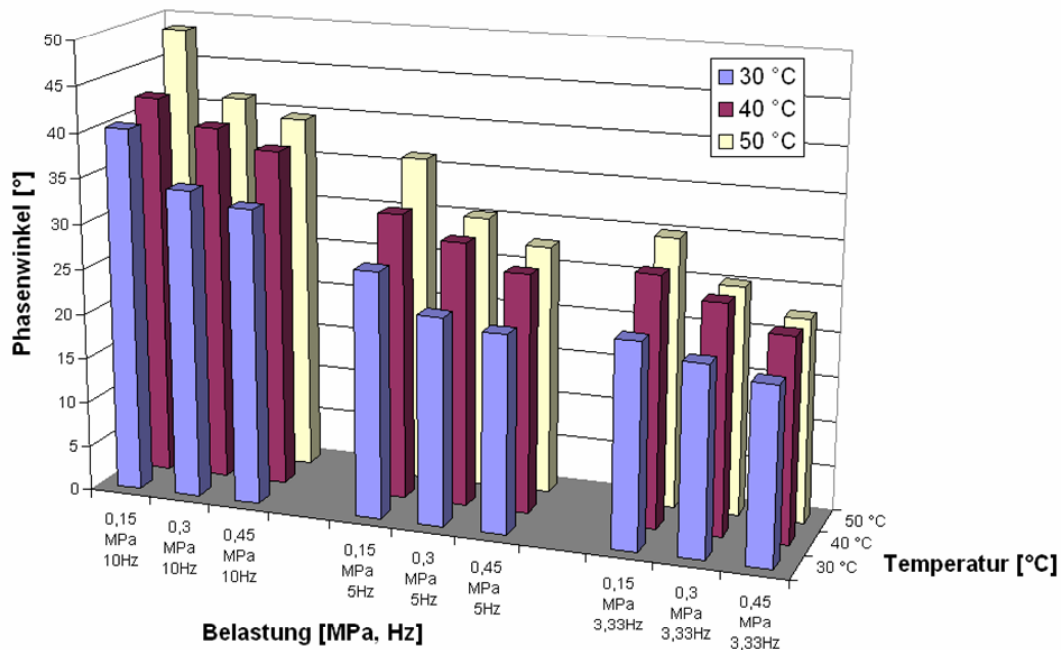


Abb. 4-28: Phasenwinkel, ermittelt bei unterschiedlichen Beanspruchungen – DSV (ABi)

Dieses Verhalten erscheint unplausibel, da aus Bitumenuntersuchungen mit dem dynamischen Scher-Rheometer bekannt ist, dass mit steigender Frequenz der Phasenwinkel kleiner wird (siehe Kapitel 3.1.3). Rheologisch betrachtet bedeutet dies, dass weniger Zeit zum Fließen verbleibt und dadurch überwiegend das elastische Materialverhalten angesprochen wird.

Nicht nur beim Asphaltbindermaterial wurden hohe Phasenwinkel bei hohen Frequenzen gemessen, sondern auch bei allen anderen untersuchten Asphaltvarianten zeigte sich dieser Trend, siehe Abbildung 4-29.

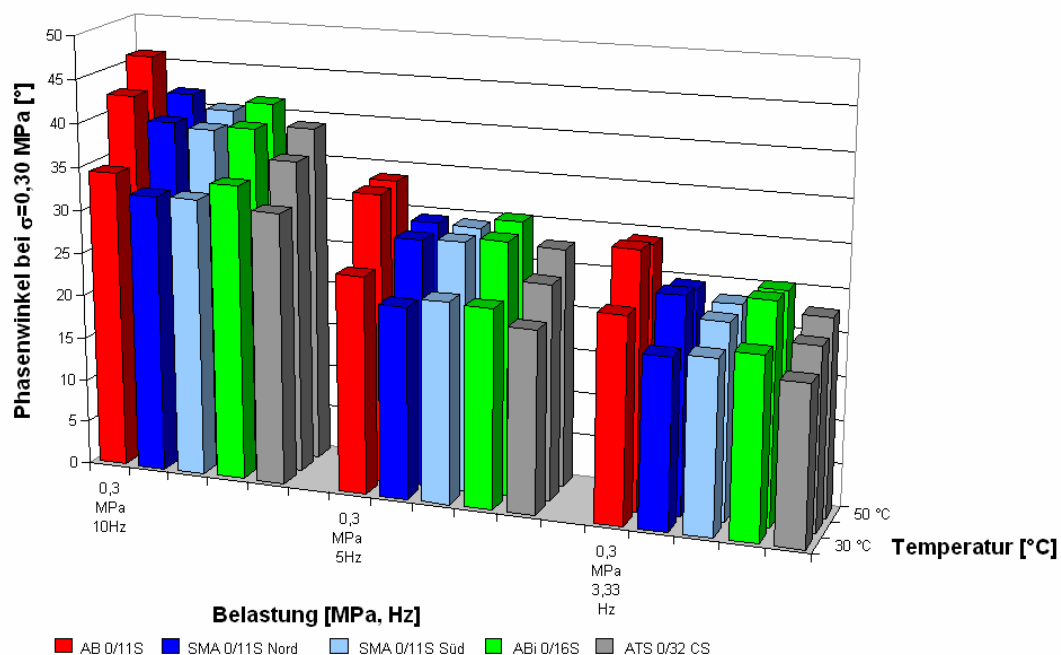


Abb. 4-29: Vergleich der Phasenwinkel verschiedener Asphaltvarianten - DSV

Eine Ursache für dieses unerwartete Materialverhalten könnte an der Belastungsart und der Auswertung der Zeitverschiebung mit der Einheit [°] liegen. Bei den Versuchen mit dem dynamischen Scher-Rheometer handelt es sich um Wechselversuche, bei denen das Bitumen sowohl einer Druck- als auch einer Zugschwellbelastung ausgesetzt ist.

Die Probekörper der Druckschwellversuche werden nur mit einer Schwellbelastung im Druckbereich belastet. Unter Berücksichtigung der in der klassischen Rheologie gebräuchlichen Modellansätze, ergeben sich - mit Hilfe des in Reihe geschalteten Maxwell- und Voigt-Kelvin-Elementes (Kapitel 3.1.1.3) - folgende Erklärungsansätze, siehe Abbildung 4-30.

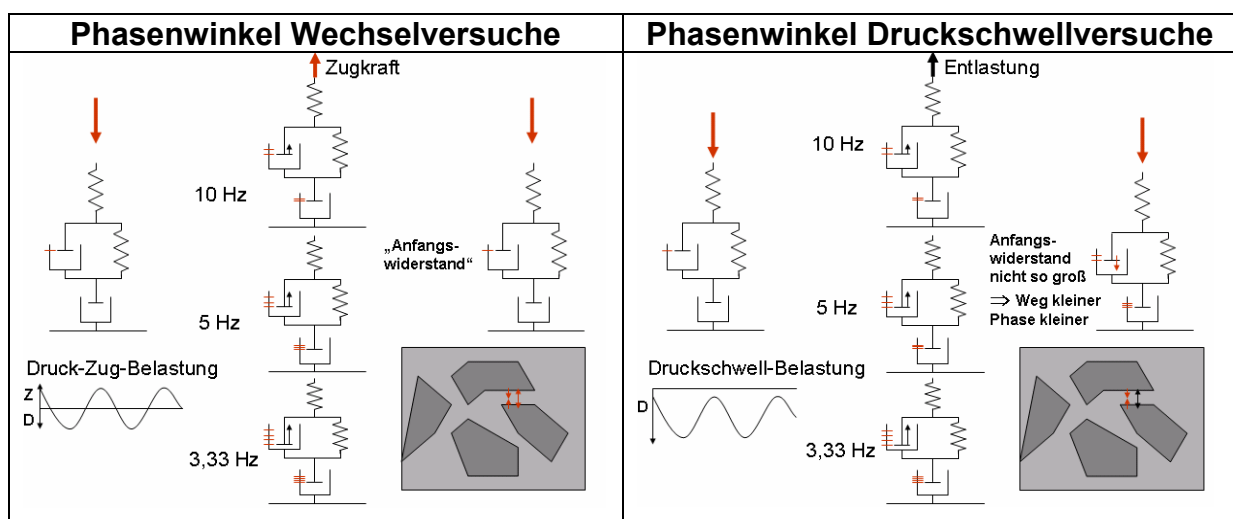


Abb. 4-30: Erklärungsansatz unter Berücksichtigung der Rheologie

Das Voigt-Kelvin-Element spiegelt das viskoelastische Materialverhalten wider, welches durch Parallelschaltung von Feder und Dämpfer charakterisiert ist. Dieses Element wird bei Wechselbeanspruchung gestaucht und gestreckt. Die je Lastwechsel sich einstellenden Verformungen des Dämpfers im Voigt-Kelvin-Element nehmen nach dem Einschwingen wie auch während des Versuchs einen konstanten Wert an. Je kleiner die Frequenz wird, desto tiefer dringt der Kolben des Dämpfers aufgrund der höheren Lasteinwirkungsdauer in die Newtonsche Flüssigkeit ein und umso größer wird der viskose Anteil der Verformung. Übertragen auf die für das viskoelastische Verhalten von Asphalt verantwortliche Komponente Bitumen bedeutet dies, dass durch die äußere Wechselbeanspruchung das Bitumen zusammengedrückt und auseinander gezogen wird, siehe Abbildung 4-30.

Bei den Druckschwellversuchen wird das Voigt-Kelvin-Element nur mit einer schwellenden Druckbeanspruchung belastet. Der Kolben des Dämpfers dringt bei jedem

Lastwechsel bis zu einem gewissen Grad in die viskose Flüssigkeit ein und die parallel geschaltete Feder wird dabei vorgespannt. Sobald sich aber die Druckspannung verringert, wird der Kolben infolge der vorgespannten Feder in umgekehrter Richtung beansprucht und bewegt sich in Richtung der Ausgangsposition. Das Bitumen wird somit zusammengedrückt und entspannt sich sobald die äußere Belastung nachgibt.

Durch die nicht aufgezwungene Rückverformung bei den Druckschwellversuchen infolge einer Zugkraft, wie es bei den Wechselversuchen der Fall ist, ergeben sich bei gleicher Viskosität der Newtonschen Flüssigkeit des Dämpfers geringere Rückverformungen, wodurch der Kolben im Dämpfer aber nicht mehr die Ausgangslage erreicht. Erst nach Versuchsende, bei vollkommener Entlastung wird die Ausgangslage erreicht. Durch den gegenüber Wechselversuchen verkürzten Weg im Dämpfer bei gleicher Frequenz reagiert das Voigt-Kelvin-Element weniger viskos während eines Lastwechsels und es werden bei den Schwellversuchen kleinere Phasenwinkel erreicht. Mit diesen Überlegungen wird im Folgenden die Auswertung der Zeit zwischen dem Maximum der axialen Spannung und dem Maximum der axialen Dehnung als Phasenwinkel mit der Einheit $[\circ]$ für Schwellversuche bei hohen Temperaturen in Frage gestellt.

In der Abbildung 4-31 sind verschiedene Verläufe von Phasenwinkeln mit der Einheit $[\circ]$ und Phasen mit der Einheit $[\text{ms}]$ über die Lasteinwirkungsdauer aufgetragen dargestellt.

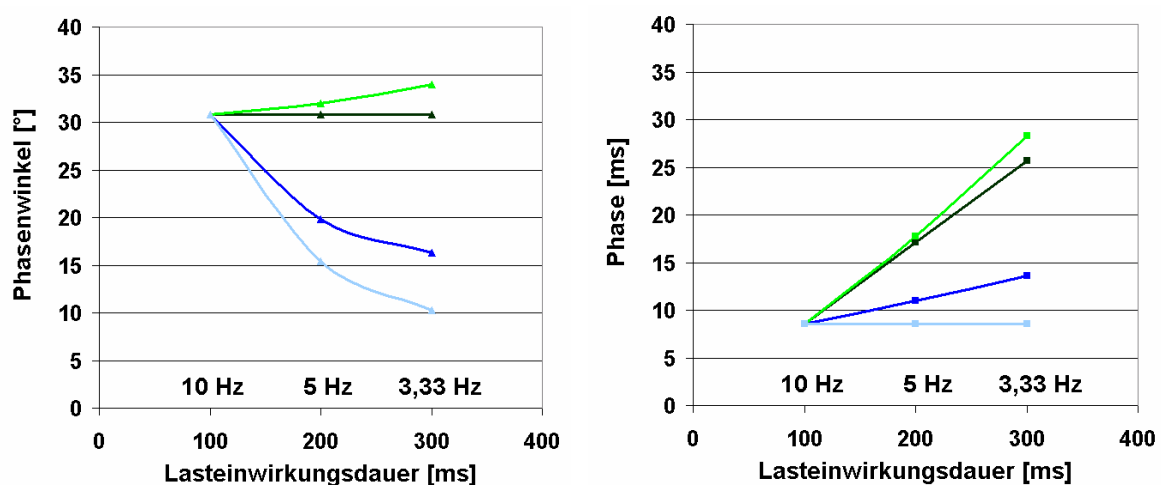


Abb. 4-31: Verschiedene Verläufe von Phasenwinkel und Phasen aufgetragen über die Lasteinwirkungsdauer

Die hellgrüne Kurve repräsentiert das Verhalten von viskosen Materialien, wie es auch aus zahlreichen veröffentlichten Bitumenuntersuchungen bekannt ist, z.B. [Hagner 2003]. Der Phasenwinkel steigt mit kleiner werdender Frequenz bzw. mit längerer Lasteinwirkungsdauer. Gleiches gilt für die Phase in ms. Entgegen diesem Verhalten verringert sich der Phasenwinkel der blauen Kurven - bei kleiner werdender Frequenz bzw. längerer Lasteinwirkungsdauer. Die Phase steigt jedoch. Es werden trotz steigender Zeitspannen (Anstieg der Phase) kleiner werdende Phasenwinkel berechnet.

Um den Einfluss der Frequenz mit dem Phasenwinkel zu verdeutlichen, muss der Unterschied der Phase in [ms] bei 10, 5 und 3,33 Hz so groß sein, dass er sich bei der mit der Einheit [°] skalierten Abszisse bemerkbar macht.

Mit den vorab dargelegten Annahmen, dass bei hohen Prüftemperaturen bei Schwellversuchen kleinere Phasenverschiebungen als bei Wechselversuchen gemessen werden und dass die Differenz zwischen den Phasenwinkeln 10, 5 und 3,33 Hz infolge der freien Rückverformung geringer ausfallen, ist der gegenläufige Trend des Phasenwinkels plausibel. Dies wird durch die beiden blauen Kurven verdeutlicht.

Werden die Phasenverschiebungen gemessen am ABi bei den unterschiedlichen Beanspruchungskombinationen als Phase in ms dargestellt, verringert sich diese Kenngröße bei allen untersuchten Temperaturen und Oberspannungen mit Zunahme der Frequenz, siehe Abbildung 4-32.

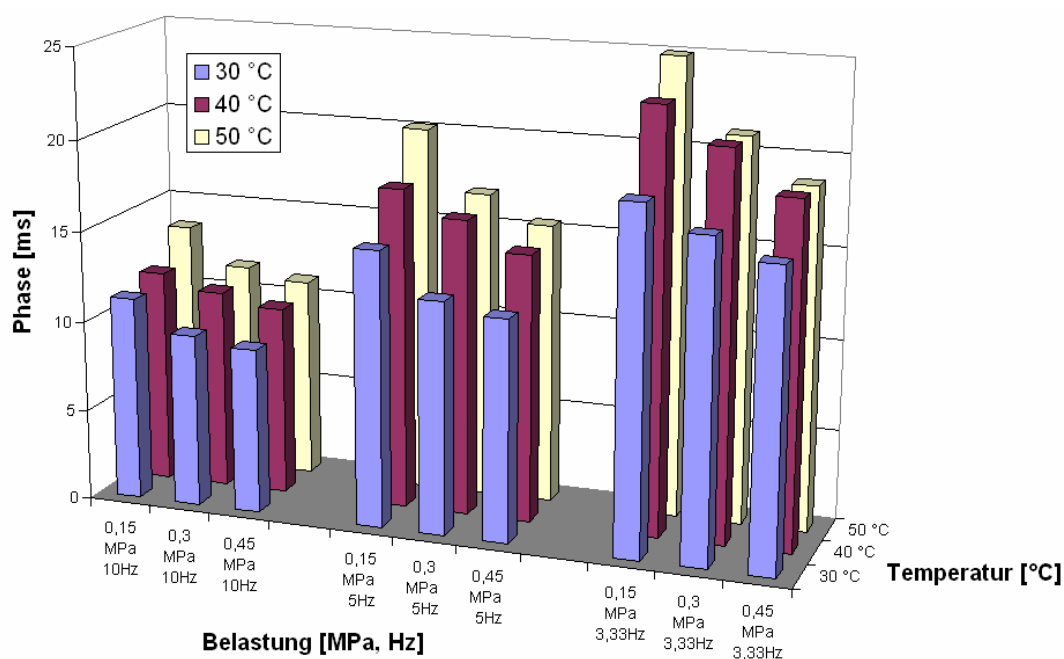


Abb. 4-32: Phase, gemessen bei unterschiedlichen Beanspruchungen – DSV (ABi)

Aus diesen Ergebnissen ist die Schlussfolgerung zu ziehen, dass die Phasenverschiebung bei Druckschwellversuchen ohne Lastpause nicht als Phasenwinkel in [°], sondern als Phase in [ms] angegeben werden muss.

Die bei den einaxialen Druckschwellversuchen gemessenen Phasen der untersuchten Asphaltvarianten sind in der folgenden Abbildung dargestellt.

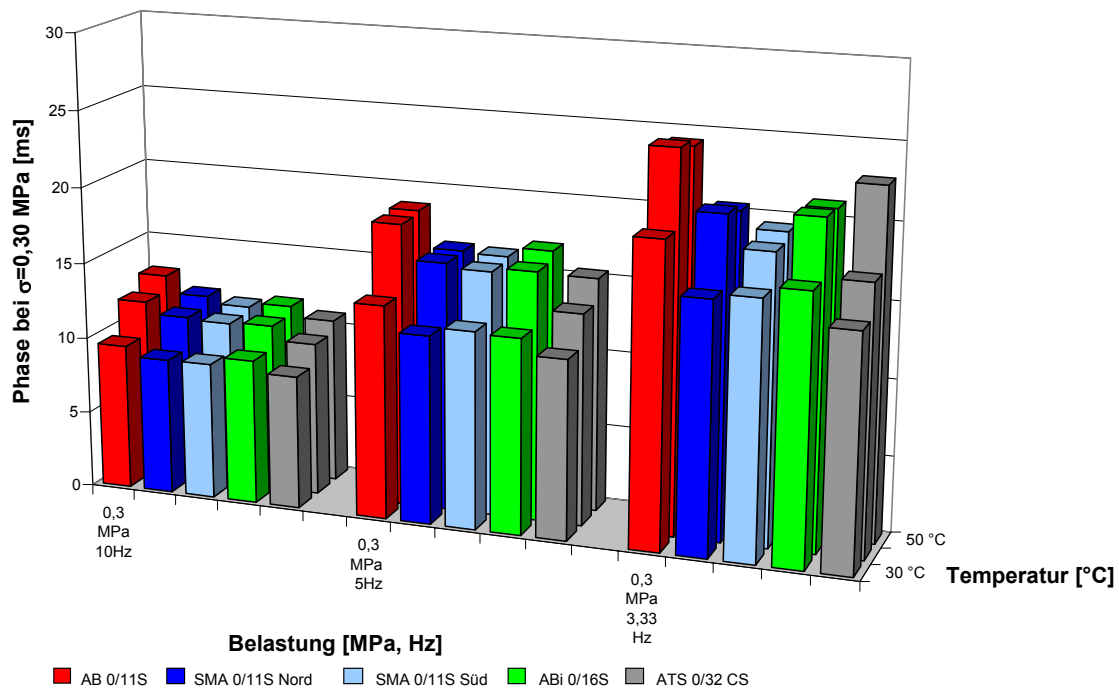


Abb. 4-33 Vergleich der Phasen verschiedener Asphaltvarianten - DSV

An der Asphaltbetonvariante werden bei den drei geprüften Frequenzen und Temperaturen die größten Zeiträume zwischen dem Maximum der axialen Spannung und dem Maximum der axialen Dehnung gemessen. Die geringsten Phasen mit Ausnahme bei 50 °C und 3,33 Hz zeigt die Asphalttragschichtvariante. Eine eindeutige Unterscheidung der beiden Splittmastixvarianten und des Asphaltbinders ist aufgrund der geringen Unterschiede der Phasen nicht möglich.

4.3.3 Dynamischer Triaxialversuch - elastische und viskoelastische Kennwerte

4.3.3.1 Räumlicher Spannungszustand

Die Probekörper werden bei den dynamischen Triaxialversuchen einem dreidimensionalen Spannungszustand ausgesetzt. Als hydrostatischer Spannungszustand wird der Zustand bezeichnet, bei dem alle Oberflächen des Probekörpers mit einer gleichen Spannung beansprucht werden, siehe Abbildung 4-34. Wirkt zusätzlich in einer Achsrichtung ein weiterer Spannungsanteil, wird dieser als deviatorischer Spannungsanteil bezeichnet.

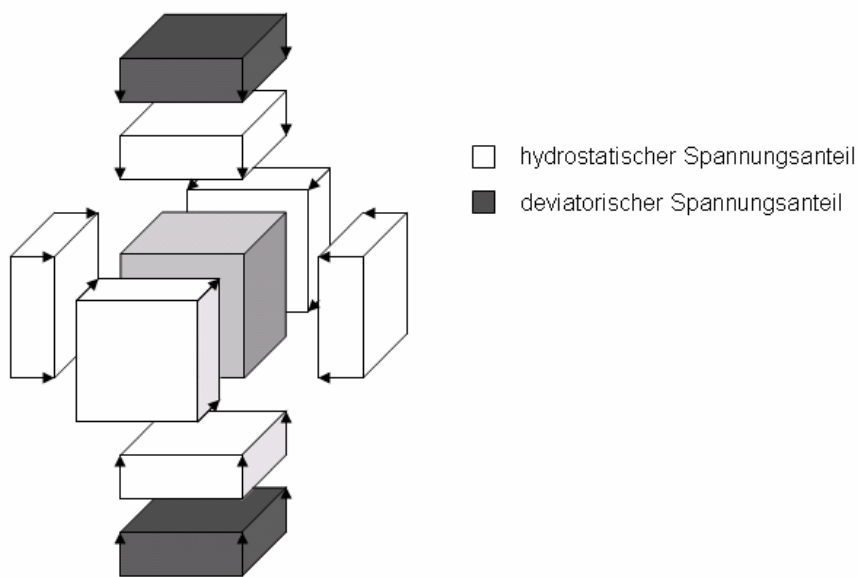


Abb. 4-34: Spannungsanteile

Berechnen lässt sich der deviatorische Spannungsanteil σ_{Dev} für rotationssymmetrische Probekörper mit der Gleichung 4-1.

$$\sigma_{\text{Dev}} = \sqrt{\left[\left(\sigma_{\text{ax}} - \frac{\sigma_{\text{ax}} + 2 \cdot \sigma_{\text{rad}}}{3} \right)^2 + 2 \cdot \left(\sigma_{\text{rad}} - \frac{\sigma_{\text{ax}} + 2 \cdot \sigma_{\text{rad}}}{3} \right)^2 \right]} \cdot \frac{3}{2} \quad \text{Gleichung 4-1}$$

$$\sigma_{\text{Dev}} = \sigma_{\text{ax}} - \sigma_{\text{rad}}$$

mit σ_{ax} Axialspannung [MPa]

σ_{rad} Radialspannung [MPa]

Wird z.B. ein rotationssymmetrischer Probekörper axial mit 1,0 bzw. 0,3 MPa und radial mit 0,3 bzw. 1,0 MPa beansprucht, verformt sich der Probekörper qualitativ unter Annahme eines linear elastischen Materialverhaltens wie folgt:

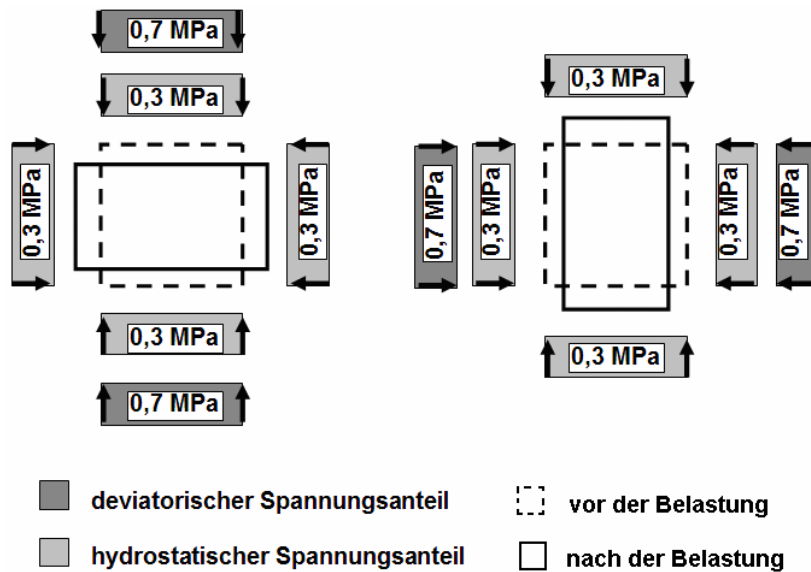


Abb. 4-35: Verformungen bei unterschiedlichen Spannungszuständen, vereinfacht 2-D

Das Verformungsverhalten wird über das Verhältnis von Querdehnung zu Längsdehnung bestimmt, welches als Querdehnzahl μ [DIN 1342-1] definiert ist. Für den Baustoff Asphalt sind Querdehnzahlen im Bereich von 0,25 bis 0,4 üblich, wobei die größeren Werte bei hohen Temperaturen angesetzt werden. Gebräuchlich ist eine Querdehnzahl von 0,35 [FGSV 2006].

Gemäß den Forschungsvorhaben [Arand 1996, Renken 2005] gilt es auch im Rahmen dieser Untersuchungen, radiale Stauchungen, d.h. eine „Verschlankung“ des Probekörpers unter Last zu vermeiden ($\epsilon_{\text{rad}} \geq 0$), vgl. Kapitel 3.2.1.1. Die dafür maximal zu erzeugende Radialspannung (unter Annahme eines isotropen, linear-elastischen Materialverhaltens) wird näherungsweise mit der Gleichung 4-2 ermittelt.

$$\epsilon_{\text{rad}} = \frac{\sigma_{\text{rad}} - \mu \cdot (\sigma_{\text{ax}} + \sigma_{\text{rad}})}{E} \quad \text{Gleichung 4-2}$$

$$\epsilon_{\text{rad}} = 0$$

$$\Rightarrow \sigma_{\text{rad}} = \sigma_{\text{ax}} \cdot \frac{\mu}{1 - \mu}$$

$$\sigma_{\text{rad}} / \sigma_{\text{ax}} = \frac{\mu}{1 - \mu}$$

Beispielsweise berechnet sich bei einer axialen Spannung von 1,0 MPa, einer Querdehnzahl von 0,35 und einer radialen Dehnung von 0 die maximal zu erzeugende radiale Spannung zu 0,54 MPa.

Demnach ergibt sich für die Bedingung $\epsilon_{\text{rad}} = 0$ der Spannungs- und qualitativer Dehnungszustand in Abb. 4-36.

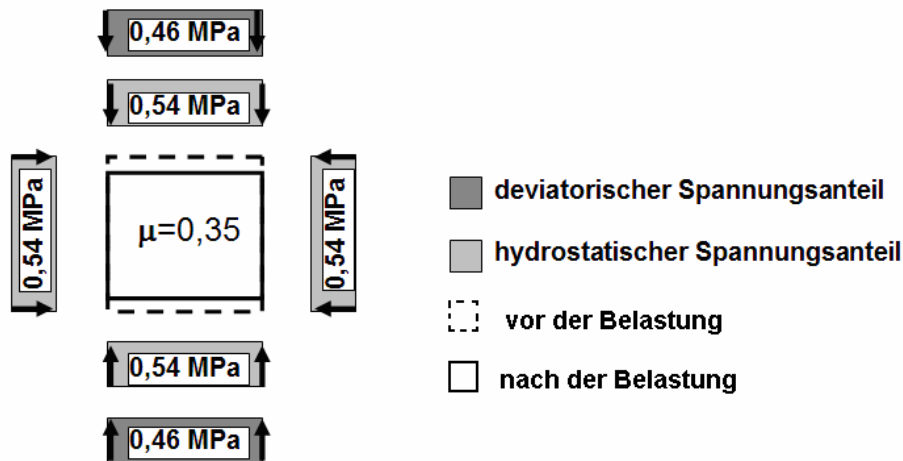


Abb. 4-36: Spannungszustand für die Bedingung $\epsilon_{rad}=0$, vereinfacht 2-D

Bezogen auf Triaxialversuche, bei denen axiale Spannungen von 1,0 MPa erzeugt werden, bedeutet dies, dass bei radial zu erzeugenden Spannungen größer als 0,54 MPa (unter Annahme eines linear elastischen Materialverhaltens) mit radialen Stauchungen des Probekörpers gerechnet werden muss. Diese berechnete Spannung ist abhängig von der Querdehnzahl, siehe Gleichung 4-2. Je steifer das Material ist, desto kleiner ist die Querdehnzahl und umso kleiner sind die aufzubringenden radialen Spannungen zur Erfüllung der Bedingung $\epsilon_{rad} = 0$, siehe Abbildung 4-37.

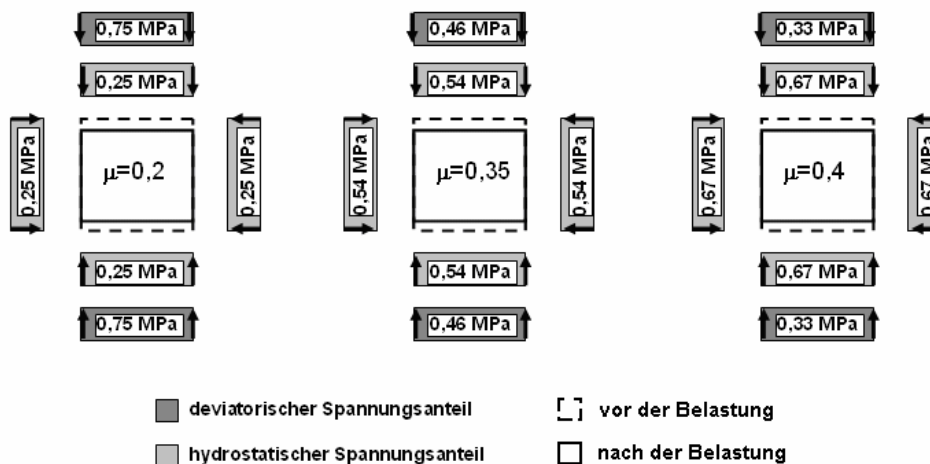


Abb. 4-37: Spannungszustände unter Berücksichtigung von unterschiedlichen Querdehnzahlen

Mit diesen Überlegungen lassen sich die sehr geringen Stützdrücke der Triaxialversuche bei der Verwendung von Marshall-Probekörpern gegenüber von Bohrkernen erklären. Marshall-Probekörper besitzen aufgrund des Verdichtungsprozesses höhere Steifigkeiten als Bohrkern und somit kleinere Querdehnzahlen. Um radial

keine Stauchung zuzulassen, dürfen unter Annahme eines linear elastischen Materialverhaltens und den vorherigen Überlegungen nur geringe radiale Spannungen aufgebracht werden.

Da die Abmessungen der für die Triaxialversuche verwendeten Probekörper mit einem h/d -Verhältnis von 0,8 nicht den Anforderungen für einen homogenen Spannungszustand im Probekörper gerecht werden ($h/d = 1,25 - 2$), vergrößert sich durch den Einfluss der Reibung zwischen Laststempel und Probekörperendfläche (Kapitel 4.2.1) der Widerstand gegen Verformungen. Durch die erhöhte Steifigkeit und der damit verbundenen geringen Querdehnzahl verringert sich die maximal aufzubringende radiale Spannung. Dieser Effekt kann aufgrund der beschränkten Einbauhöhe der Probekörper in der zur Verfügung stehenden Triaxialprüfmaschine nicht eliminiert werden.

Da Asphalt nicht linear elastisch reagiert, sondern durch die unterschiedlichen Eigenschaften der einzelnen Bestandteile des Baustoffes elastisches, plastisches und viskoses Verhalten zeigt, siehe Kapitel 3.1.1, ist der Wert der berechneten radialen Spannung als Näherungswert zu betrachten.

4.3.3.2 Absoluter Elastizitätsmodul - Triax

In der DIN EN 12697-25 ist eine Auswertung der Triaxialversuche hinsichtlich des Elastizitätsmoduls nicht vorgesehen. Um dennoch diese Kenngröße zu ermitteln, muss die Voraussetzung eines homogenen Spannungszustandes im Probekörper während des Versuchs erfüllt sein (h/d Verhältnis 1,25 – 2). Aufgrund der Konfiguration der Braunschweiger Triaxialprüfmaschine, bei der Probekörper mit einem maximalen Durchmesser von 100 mm und einer maximalen Höhe von 80 mm geprüft werden können, und den Überlegungen in den Kapiteln 4.2.1 und 4.2.2 ist diese Bedingung nicht erfüllt. Die ermittelten absoluten Elastizitätsmoduln sind somit mit einem Fehler behaftet, dessen Größe abzuschätzen ist.

Da bei den Triaxialversuchen sowohl Axial- als auch Radialspannungen im Probekörper erzeugt werden, ist zur Berechnung des absoluten Elastizitätsmoduls die Gleichung 3-1 zu erweitern. In der folgenden Tabelle sind die Spannungen und

resultierenden Dehnungen unter Annahme eines linear elastischen Materialverhaltens im Triaxialversuch dargestellt [Leutner 2006].

Tabelle 4-3: Spannungen und Dehnungen beim Triaxialversuch

		Resultierende Dehnung	
		axial	radial
Angreifende Spannung	axial	$\varepsilon_{ax} = \sigma_{ax}/E$	$\varepsilon_{rad} = -\mu \cdot \sigma_{ax}/E$
	radial	$\varepsilon_{ax} = -2 \cdot \sigma_{rad} \cdot \mu / E$	$\varepsilon_{rad} = (\sigma_{rad} - \sigma_{rad} \cdot \mu) / E$
dreiaxialer Spannungszustand		$\varepsilon_{ax} = (\sigma_{ax} - 2 \cdot \sigma_{rad} \cdot \mu) / E$	$\varepsilon_{rad} = (\sigma_{rad} - \mu \cdot (\sigma_{ax} + \sigma_{rad})) / E$

Mit den in Tabelle 4-3 angegebenen Gleichungen können durch Umformen die Gleichungen 4-3 und 4-4 gebildet werden [Leutner 2006].

$$E = \frac{\sigma_{ax}^2 + \sigma_{ax} \cdot \sigma_{rad} - 2 \cdot \sigma_{rad}^2}{\varepsilon_{ax} \cdot (\sigma_{ax} + \sigma_{rad}) - 2 \cdot \varepsilon_{rad} \cdot \sigma_{rad}} \quad \text{Gleichung 4-3}$$

$$\mu = \frac{\sigma_{ax} \cdot \varepsilon_{rad} - \sigma_{rad} \cdot \varepsilon_{ax}}{\sigma_{rad} \cdot (2 \cdot \varepsilon_{rad} - \varepsilon_{ax}) - \sigma_{ax} \cdot \varepsilon_{ax}} \quad \text{Gleichung 4-4}$$

Zur Vereinfachung der Berechnung des absoluten Elastizitätsmoduls wurde zusätzlich der Kennwert mit der Gleichung 4-5 ermittelt.

$$E = \frac{\sigma_{ax} - 2 \cdot \mu \cdot \sigma_{rad}}{\varepsilon_{ax}} \quad \text{Gleichung 4-5}$$

Die Querdehnzahl μ wurde für die folgenden Berechnungen mit 0,35 angenommen [FGSV 2006].

Zum Vergleich wurden in der folgenden Abbildung die mit den Gleichungen 3-1, 4-3 und 4-5 berechneten absoluten Elastizitätsmoduln gegenübergestellt.

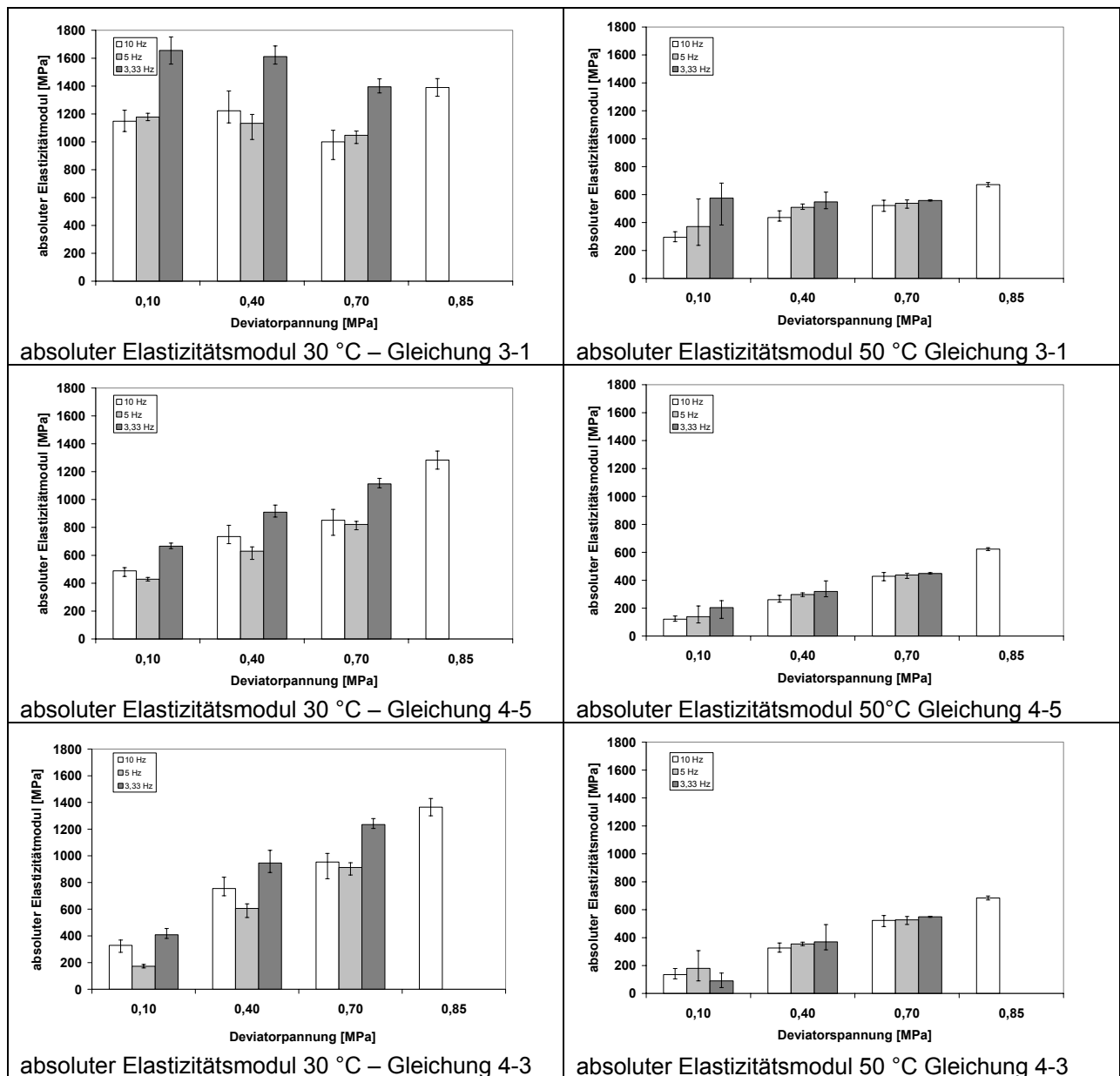


Abb. 4-38: Vergleich der absoluten Elastizitätsmoduln – Triax (AB, 30 °C und 50 °C)

Mit steigender Prüftemperatur verringern sich die absoluten Elastizitätsmoduln, die mit den drei Gleichungen berechnet wurden.

Die Tendenz, dass sich bei abnehmender Frequenz kleinere absolute Elastizitätsmoduln ergeben – wie es bei den einaxialen Druckschwellversuchen festgestellt wurde – konnte mit den Triaxialversuchsergebnissen ermittelt am Asphaltbeton nicht bestätigt werden. Vielmehr wurden Zunahmen der Kennwerte mit abnehmender Frequenz ermittelt. Dieses unplausible Verhalten konnte nicht bei allen untersuchten Asphalten nachgewiesen werden, siehe Anhang F. Es zeigt sich, dass die Zu- und Abnahmen der für die untersuchten Asphaltvarianten ermittelten absoluten Elastizi-

tätsmoduln mit steigender Frequenz bei den verschiedenen Beanspruchungszuständen (Temperatur, Last) variierten.

Als mögliche Begründung für dieses Verhalten ist das geringe h/d -Verhältnis der Probekörper zu nennen, welches einen entscheidenden Einfluss auf das Verformungsverhalten hat.

Mit den Gleichungen 4-3 und 4-5 werden unter Berücksichtigung der radialen Spannung lastabhängige Kennwerte ermittelt. Mit steigender Deviatorspannung steigen die absoluten Elastizitätsmoduln an. Ein Elastizitätsmodul ist aus linear-elastischer Sicht allerdings nicht abhängig von der Last. Da Asphalt durch das viskose Materialverhalten nicht rein linear-elastisch reagiert, ist die Anwendung der Gleichungen 4-3 und 4-5 nur bedingt möglich. Eine Berücksichtigung der Phasenverschiebung bei der Berechnung des absoluten Elastizitätsmoduls würde das Materialverhalten zutreffender beschreiben.

Werden dennoch die mit der Gleichung 4-3 und 4-5 ermittelten absoluten Elastizitätsmoduln miteinander verglichen, so zeigen sich gute Übereinstimmungen bei den Deviatorspannungen 0,4, 0,7 und 0,85 MPa. Anders verhält es sich bei der Spannung von 0,1 MPa. Die für diesen Spannungszustand berechneten E-Moduln weichen voneinander ab. Diese Abweichungen können damit begründet werden, dass die bei der Gleichung 4-5 angesetzte Querdehnzahl von 0,35 bei der Spannungs-kombination mit der hohen radialen Spannung von 0,9 MPa nicht die tatsächliche Querdehnzahl widerspiegelt.

Bei denen mit der Gleichung 3-1 berechneten absoluten Elastizitätsmoduln kann außer bei 50 °C und 10 Hz keine eindeutige Lastabhängigkeit festgestellt werden.

Um bei der Berechnung des absoluten Elastizitätsmoduls den dreiaxialen Spannungszustand zu berücksichtigen, wurden für die weitere Auswertung und den Vergleich der untersuchten Asphaltvarianten die absoluten Elastizitätsmoduln mit der Gleichung 4-5 ermittelt, siehe Abbildung 4-39.

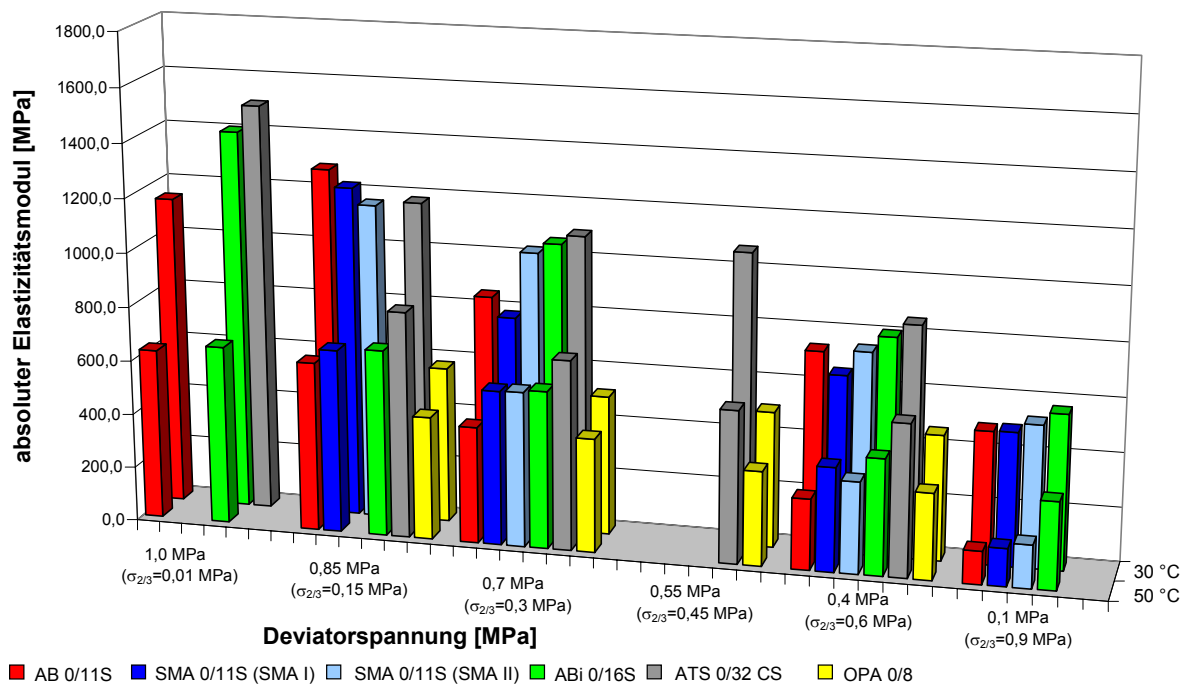


Abb. 4-39: Vergleich der absoluten Elastizitätsmoduln verschiedener Asphaltvarianten - Triax

Der Temperatureinfluss ist eindeutig erkennbar. Mit abnehmender Temperatur steigen die Werte für den absoluten Elastizitätsmodul bei allen untersuchten Asphaltvarianten. Ebenfalls steigen die Werte mit zunehmender Deviatorspannung. Die untersuchten Asphaltvarianten weisen unterschiedliche Abhängigkeiten des absoluten Elastizitätsmoduls von dem jeweiligen Beanspruchungszustand auf. Generell konnten für das Asphaltbinder- und Tragschichtmaterial höhere Werte ermittelt werden als für die Deckschichtvarianten. Die geringsten absoluten Elastizitätsmoduln weist der offenporige Asphalt auf.

4.3.3.3 Querdehnzahl

Neben dem Elastizitätsmodul ist die Querdehnzahl μ ein erforderlicher Materialkennwert für die analytische Dimensionierung. Sie ist für elastische Stoffe definiert als Betrag des Verhältnisses von Querdehnung zur Längsdehnung.

Die Querdehnzahl wird bei Versuchen mit einaxialer, sinusförmiger Belastung aus dem Verhältnis der Amplituden der Quer- und Längsdehnung (Radial- und Axialdehnung) berechnet.

$$|\mu| = \varepsilon_{\text{radial}} / \varepsilon_{\text{axial}}$$

Gleichung 4-6

In der folgenden Abbildung sind die am Asphaltbeton ermittelten Querdehnzahlen dargestellt.

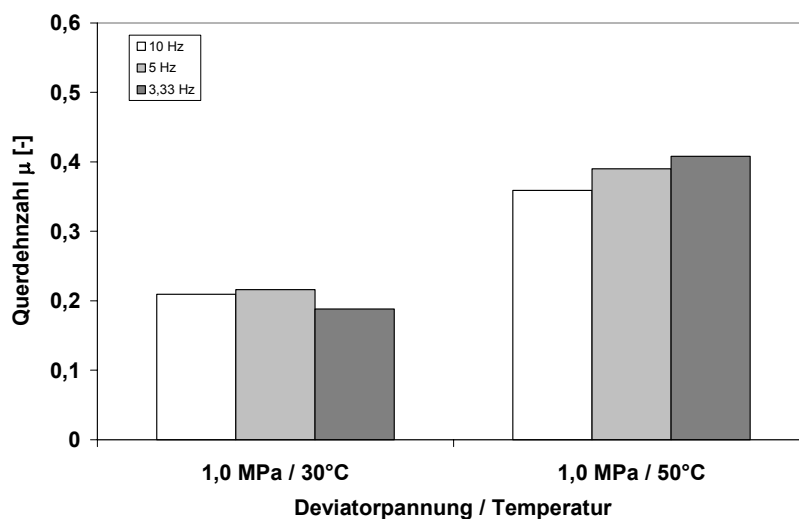


Abb. 4-40: Querdehnzahl – DSV (AB)

Bei den Versuchen zur Bestimmung dieser Querdehnzahlen handelt es sich um einaxiale Druckschwellversuche mit einer axial erzeugten Spannung von 1,0 MPa, die wegen der notwendigen radialen Verformungsmessung in der Triaxialprüfmaschine durchgeführt wurden. Die radial gemessenen Verformungen sind allerdings aufgrund der Anordnung des Messsystem außerhalb der Druckzelle, siehe Abbildung 3-6, mit einem Fehler behaftet, da die Kompression der Gummimembran mit in die Verformungsmessung einfließt. Diese Messungenauigkeit wird im Folgenden vernachlässigt.

Mit zunehmender Prüftemperatur steigt die Querdehnzahl. Der Temperatureinfluss ist deutlich stärker als der Frequenzeinfluss, der eindeutig nur bei der Prüftemperatur von 50 °C festgestellt werden konnte.

Dort steigt mit Abnahme der Frequenz die Querdehnzahl an. Die Absolutwerte decken sich mit den in der Literatur angegebenen. Danach sind für den Baustoff Asphalt Querdehnzahlen im Bereich von 0,25 bis 0,4 gebräuchlich, wobei die größeren Werte bei hohen Temperaturen gelten.

Für die Temperaturabhängigkeiten der Querdehnzahlen stellte Witzcak folgende Verhaltensweise und Größenordnung auf [Witzcak 2002], siehe Abbildung 4-41.

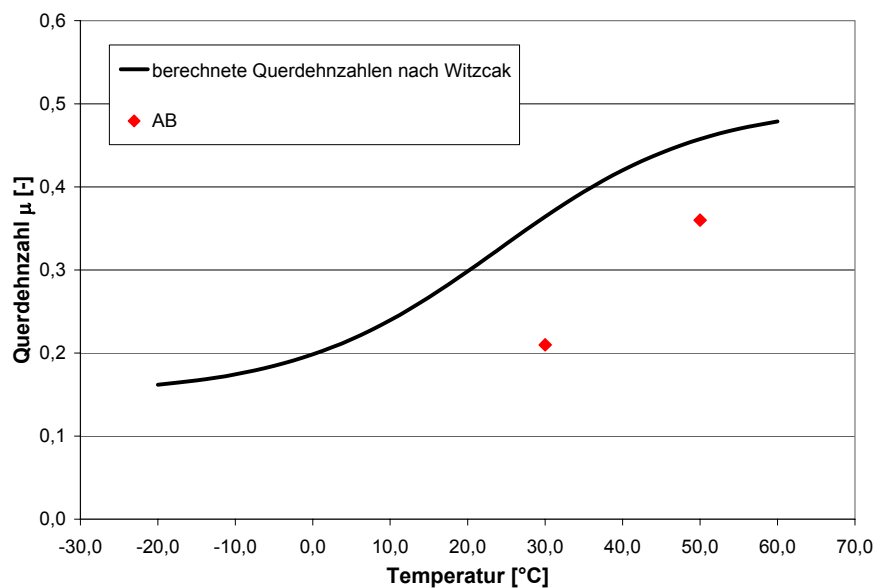


Abb. 4-41: Temperaturabhängigkeit der Querdehnzahl

Werden die Querdehnzahlen nach Witzcak mit den experimentell am Asphaltbeton ermittelten Querdehnzahlen (einaxialer Druckschwellversuch mit einer axialen Spannung von 1,0 MPa) verglichen, so liegen die Querdehnzahlen nach Witzcak deutlich höher. Dieser Unterschied liegt zum Einen am mischgutspezifischen Materialverhalten und zum Anderen am geringen h/d-Verhältnis der verwendeten Probekörper, siehe Kapitel 4.2.2.

Wie sich die Werte der Querdehnzahlen verändern, wenn die elastischen Dehnungen nicht durch einen einaxialen, sondern einen dreiaxialen Spannungszustand erzeugt werden, kann mit den Triaxialversuchen ermittelt werden. Die am Asphaltbeton bei unterschiedlichen radialen Spannungen gemessenen elastischen axialen und radialen Dehnungen sowie die mit den Gleichungen 4-4 und 4-6 berechneten Querdehnzahlen sind in den Abbildung 4-42 und 4-43 dargestellt.

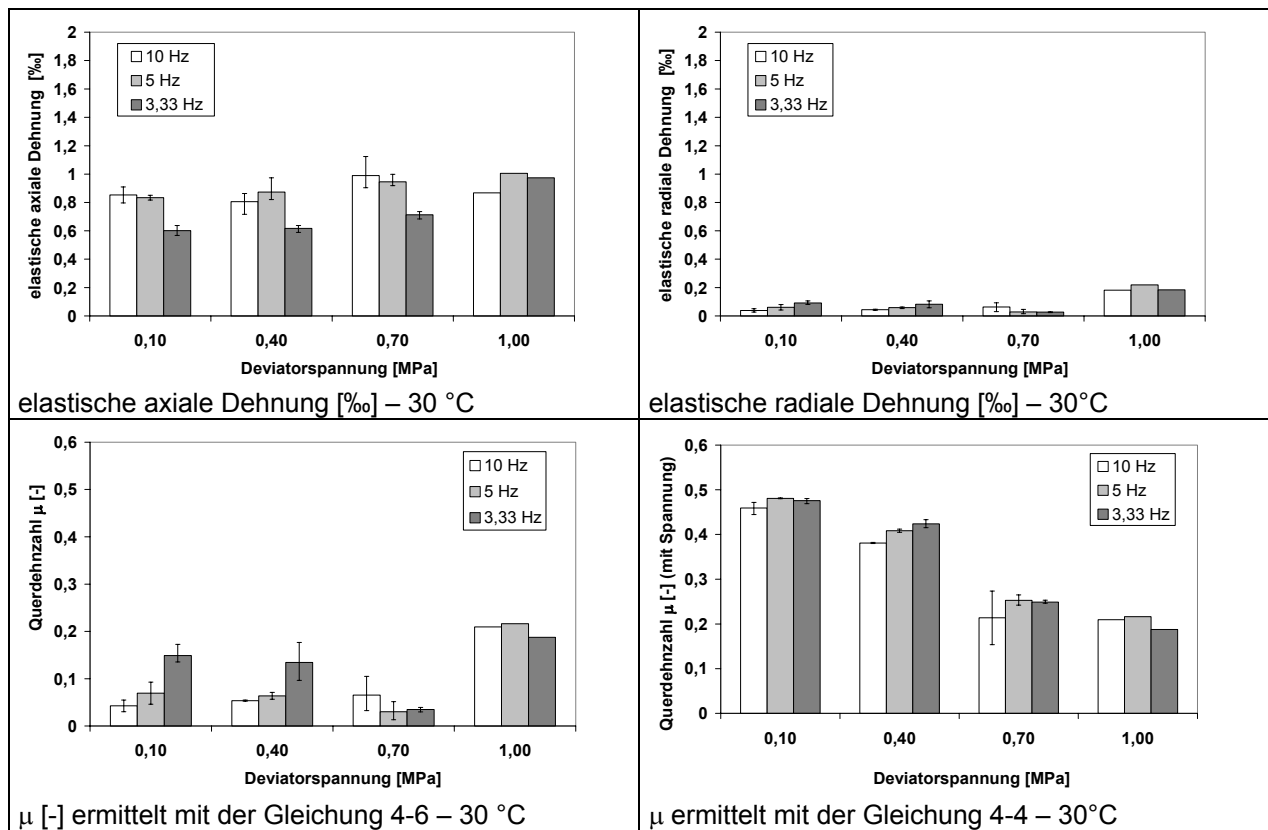


Abb. 4-42: Vergleich der elastischen axialen und radialen Dehnungen, Querdehnzahlen – Triax (AB, 30 °C)

Die elastischen axialen Dehnungen zeigen bei einer Prüftemperatur von 30 °C und den Frequenzen 5 und 3,33 Hz eine sehr geringe Lastabhängigkeit. Mit steigender Deviatorspannung, d.h. mit sinkendem radialem Druck, nehmen die Werte ab. Die um ein vielfaches kleineren elastischen radialen Dehnungen unterscheiden sich bei den Deviatorspannungen 0,1 bis 0,7 MPa nur gering voneinander. Fehlt der radiale aufgebrachte Druck, wie es bei den Versuchen mit der Deviatorspannung von 1,0 MPa der Fall ist - bei allen im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Triaxialversuchen wurde eine axiale Spannung von 1,0 MPa erzeugt -, steigen die elastischen radialen Dehnungen deutlich an.

Mit diesen gemessenen elastischen Dehnungen können mit der Gleichung 4-6, die für einaxiale Spannungszustände gilt, oder der Gleichung 4-4, die für dreiaxiale Spannungszustände unter Annahme eines linear elastischen Materialverhaltens verwendet wird, die Querdehnzahlen berechnet werden. Da bei der Gleichung 4-6 die radialen Spannungen und dadurch die behinderten Seitendehnungen nicht berücksichtigt werden, sinken die Querdehnzahlen bei den Deviatorspannungen 0,1 bis 0,7 MPa im Gegensatz zu denen bei 1,0 MPa. Die mit der Gleichung 4-4 berechneten Querdehnzahlen dürften aufgrund der in der Gleichung berücksichtigten

radialen Spannung und radialen Dehnung keine Lastabhängigkeit zeigen. Allerdings steigen mit Abnahme der Deviatorspannung die Querdehnzahlen an. Dieses Verhalten wird damit begründet, dass die maximalen Amplituden der elastischen axialen und radialen Dehnungen bedingt durch die Viskosität des Baustoffes zu unterschiedlichen Zeitpunkten erfasst werden.

Die bei 50 °C berechneten Querdehnzahlen zeigen ein ähnliches Verhalten, siehe Abbildung 4-43.

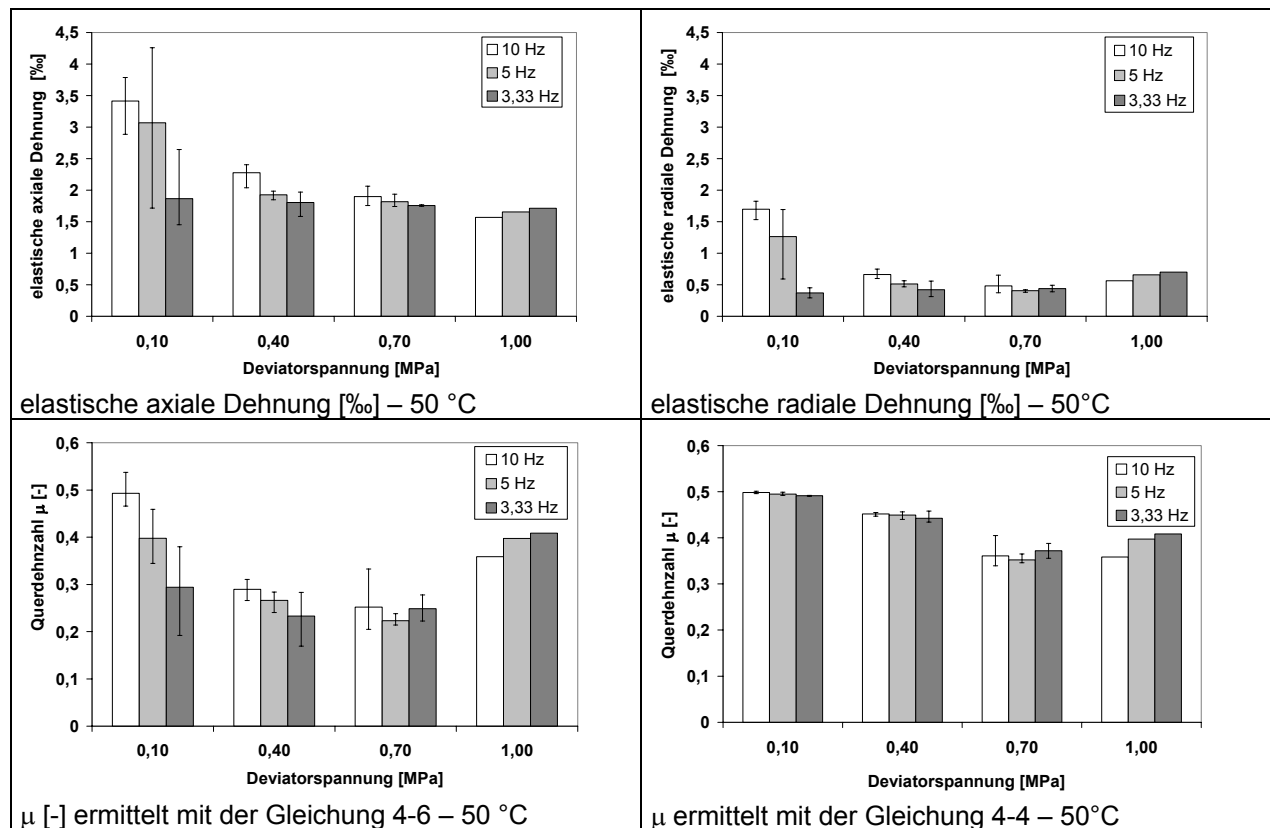


Abb. 4-43: Vergleich der elastischen axialen und radialen Dehnungen, Querdehnzahlen – Triax (AB, 50 °C)

Durch den Einfluss der Prüftemperatur steigen die gemessenen elastischen Dehnungen erwartungsgemäß deutlich an. Entgegen den bei 30 °C ermittelten Tendenzen, werden deutlich höhere elastische Dehnungen bei 50 °C und einer Deviatorspannung von 0,1 MPa gemessen als bei den Spannungen 0,4 bis 1,0 MPa. Dieses Verhalten wird auch von den Ergebnissen der beiden Splittmastixvarianten bestätigt, siehe Anhang F. Bei der offenporigen Asphaltvarianten und der Asphalttragschicht wurde dieser Beanspruchungszustand nicht erzeugt. Die Asphaltbindervariante zeigt bei der Deviatorspannung von 0,1 MPa keine Erhöhung der elastischen Dehnungen, siehe Anhang F.

Eine mögliche Erklärung für dieses Verhalten bei 50 °C und einer Deviatorspannung von 0,1 MPa ist der im Gegensatz zu den anderen Beanspruchungskombinationen kleinere aufgebrauchte Phasenwinkel σ_{axial} zu σ_{radial} . Durch eine nicht zeitlich abgestimmte Lastaufbringung – die maximal radiale Spannung muss zum Zeitpunkt der maximal erzeugten radialen Dehnung erfolgen – kommt es zu einem „Einschwingen des Probekörpers“, der höhere elastische Dehnungen verursacht.

Um für die unterschiedlichen Asphaltvarianten jeweils lastunabhängige Querdehnzahlen festzulegen, sind die Querdehnzahlen der Versuche auszuwählen, die ohne radial aufgebrauchte Drücke (unbehinderter Seitendehnung) ermittelt und bei denen die radialen Dehnungen gemessen wurden. Da dies nicht mit allen im Prüfprogramm enthaltenen Asphalten durchgeführt wurde, werden für den folgenden Vergleich die im dreiaxialen Spannungszustand mit einer Deviatorspannung von 0,7 MPa und der Gleichung 4-4 ermittelten Querdehnzahlen herangezogen. Die Wahl wurde aus dem Grunde getroffen, da bei einer Deviatorspannung von 0,7 MPa der Lasteinfluss auf die am AB ermittelten Querdehnzahlen sowohl bei 30 °C und bei 50 °C noch sehr gering ist und dadurch die Werte nicht stark von denen ermittelt mit der Gleichung 4-6 bei 1,0 MPa ($\sigma_{\text{axial}} = 1,0 \text{ MPa}$, $\sigma_{\text{radial}} = 0 \text{ MPa}$) abweichen.

Bei allen berechneten Querdehnzahlen steigen die Werte mit Zunahme der Prüftemperatur außer bei denen der offenporigen Asphaltvariante. Dort ist kein Temperatureinfluss erkennbar, siehe Abbildung 4-44.

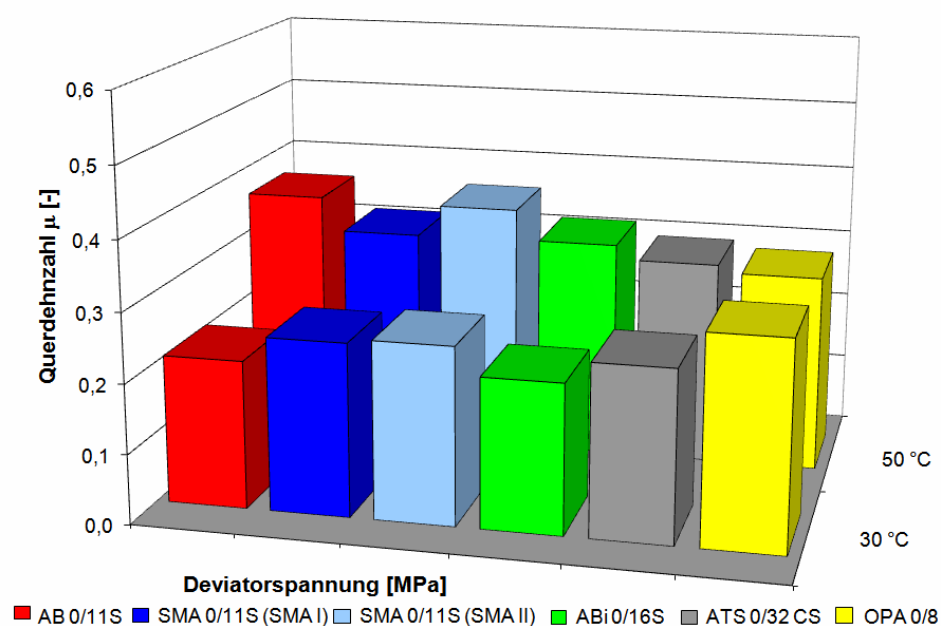


Abb. 4-44: Querdehnzahlen verschiedener Asphaltvarianten - Triax

Das Ranking der untersuchten Asphaltvarianten ist je nach Prüftemperatur unterschiedlich. Die berechneten Werte decken sich aber mit den in der Literatur genannten [FGSV 2006].

4.3.3.4 Phasenwinkel - Triax

Im Folgenden wird als Phasenwinkel der Zeitraum zwischen dem Maximum der axialen Spannung und dem Maximum der axialen Dehnung der durchgeführten dynamischen Triaxialversuche ausgewertet.

Es konnten entsprechend dem Kapitel 4.3.2.2 Zunahmen aber auch Abnahmen des Phasenwinkels mit ansteigenden Frequenzen für die verschiedenen Asphaltvarianten ermittelt werden, siehe Anhang F.

Dies zeigte sich auch bei dem Asphaltbeton. Bei einer Prüftemperatur von 30 °C wurden mit abnehmender Frequenz größere Phasenwinkel gemessen und bei 50 °C und abnehmender Frequenz kleinere Phasenwinkel, siehe Abbildung 4-45.

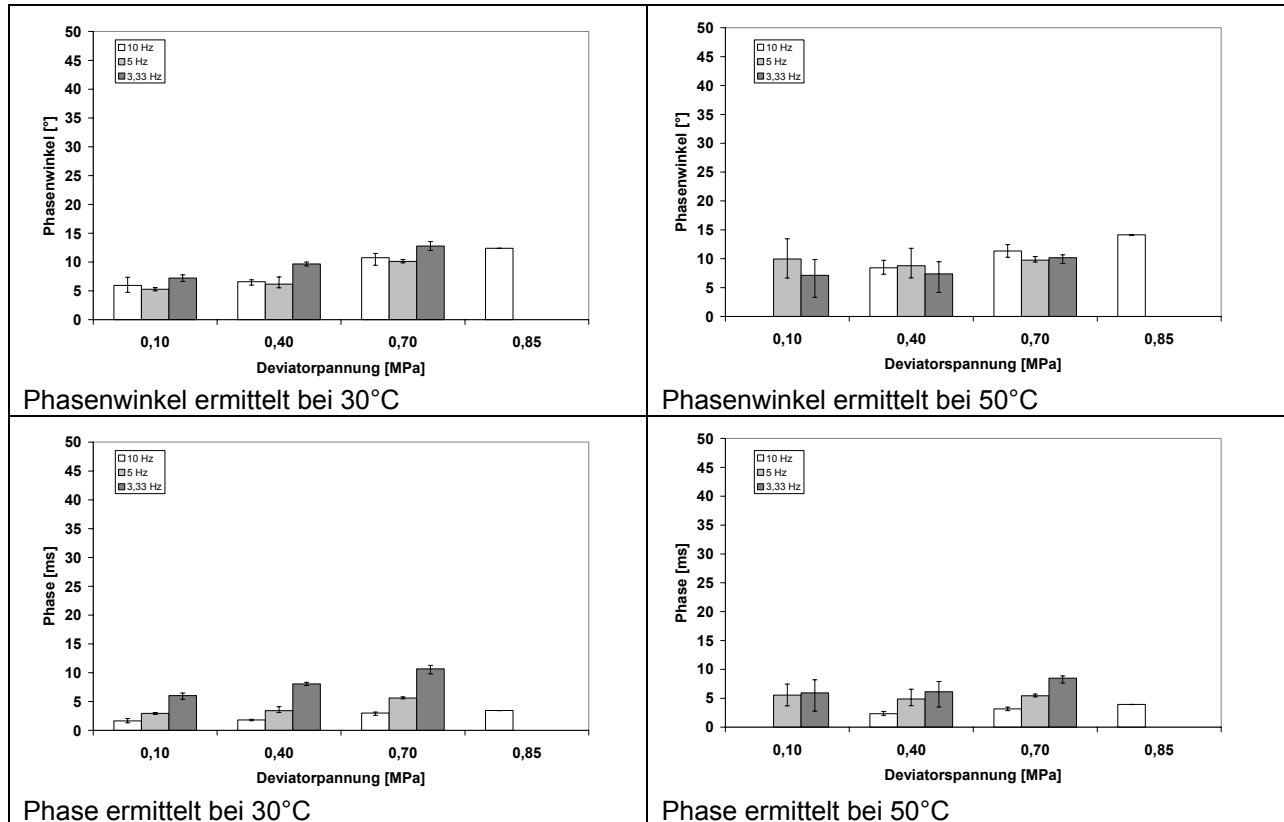


Abb. 4-45: Vergleich der Phasenwinkel und der Phasen - Triax (AB)

Wird der Zeitraum nicht als Phasenwinkel sondern als Phase ausgewertet, steigt diese mit Abnahme der Frequenz bei beiden Prüftemperaturen an. Die Begründungen für diese Tendenzen wurden im Kapitel 4.3.2.2 erläutert.

Bei den Ergebnissen der einaxialen Druckschwellversuche konnte eine Lastabhängigkeit der Phasen ermittelt werden. Diese wird auch von den Ergebnissen der Triaxialversuche bestätigt. Allerdings steigt die Phase mit Zunahme der Deviatorspannung an und fällt nicht wie bei den mit den Druckschwellversuchen ermittelten Phasen mit Zunahme der axialen Spannung ab. Begründet werden kann dieses Verhalten mit den unterschiedlich erzeugten Spannungszuständen im Probekörper (einaxialer oder dreiaxialer Spannungszustand). Werden die Phasen in einem dreidimensionalen Koordinatensystem über die axiale und radiale Spannung aufgetragen, ergeben sich plausible Abhängigkeiten, siehe Abbildung 4-46.

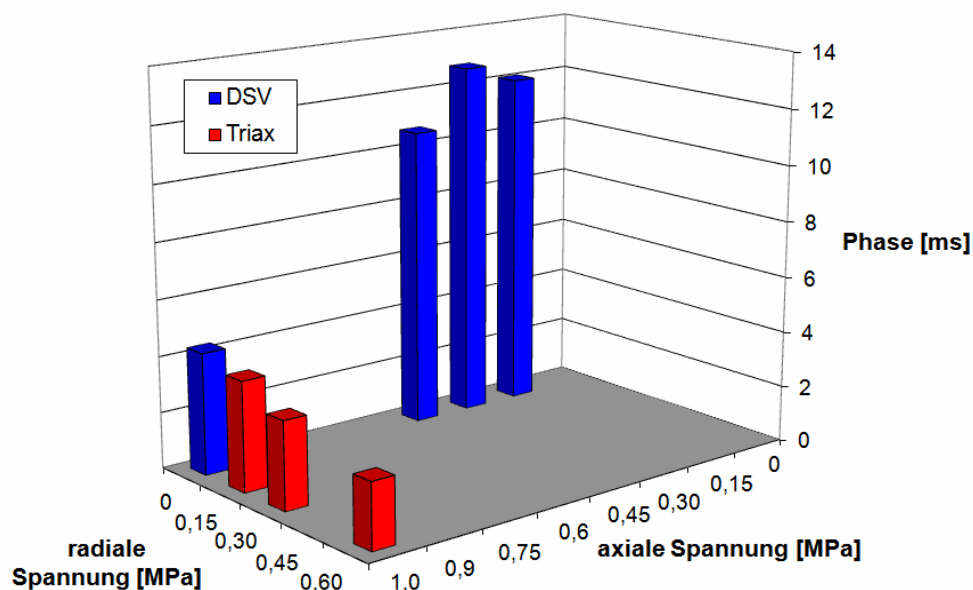


Abb. 4-46: Vergleich Phasen – DSV und Triax (AB, 50 °C, 10 Hz)

Je größer die axialen Spannungen werden, desto schneller reagiert der Asphalt und umso kleiner werden die gemessenen Phasen. Wird zusätzlich eine radiale Spannung erzeugt, nehmen die Phasen mit Zunahme dieser Spannung ab.

Für den Vergleich der untersuchten Asphaltvarianten ist die Darstellung über die Deviatorspannung jedoch ausreichend, siehe Abbildung 4-47.

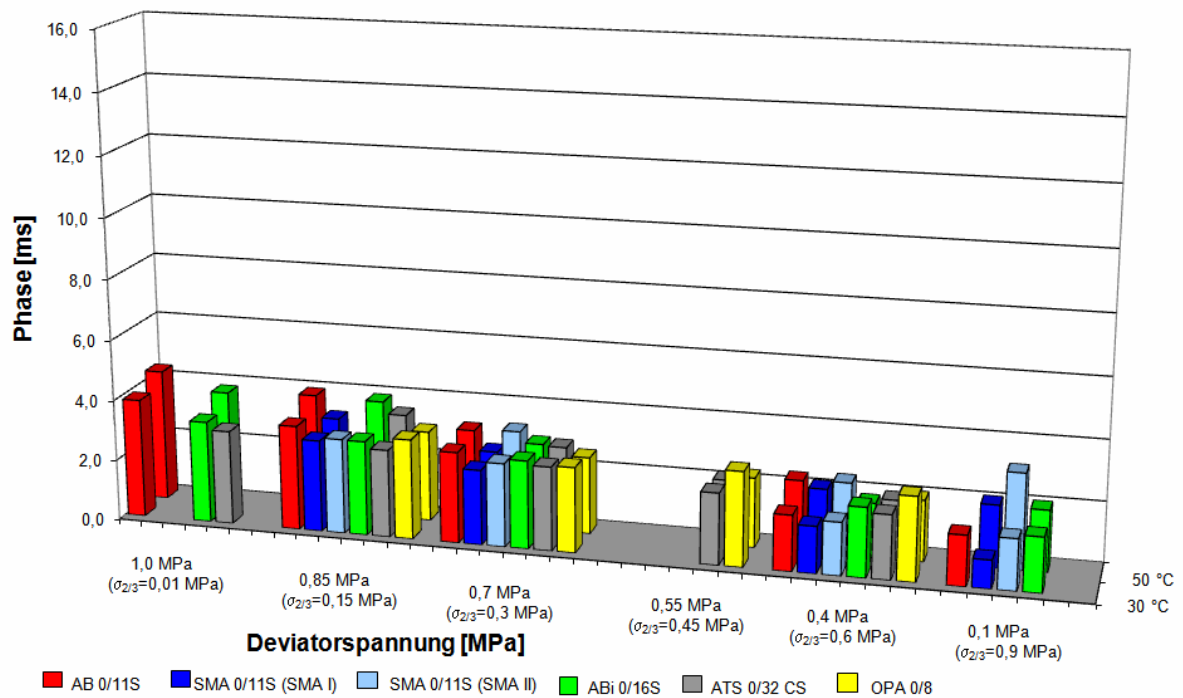


Abb. 4-47: Vergleich der Phasen verschiedener Asphaltvarianten – Triax (10 Hz)

Mit Zunahme der Deviatorspannung steigen die ermittelten Phasen aller Asphalte an. Die Erhöhung der Prüftemperatur von 30 °C auf 50 °C wirkt sich außer bei der offenenporigen Asphaltvariante mit einer zunehmenden Phase aus.

Ein Ranking der untersuchten Asphaltvarianten ist aufgrund der geringen Unterschiede der Phasen schwierig. Außerdem wechselt das Ranking der Varianten je nach Beanspruchungszustand, so dass eine einheitliche Reihung nicht möglich ist.

4.3.4 Dynamischer Stempleindringversuch - elastische und viskoelastische Kennwerte

Auch bei diesem Prüfverfahren konnten für die Messwerte elastische und viskoelastische Dehnung sowie Phasenwinkel aufgrund der konstant bleibenden Werte über den Versuchsverlauf Mittelwerte gebildet werden, siehe Abbildung 4-48.

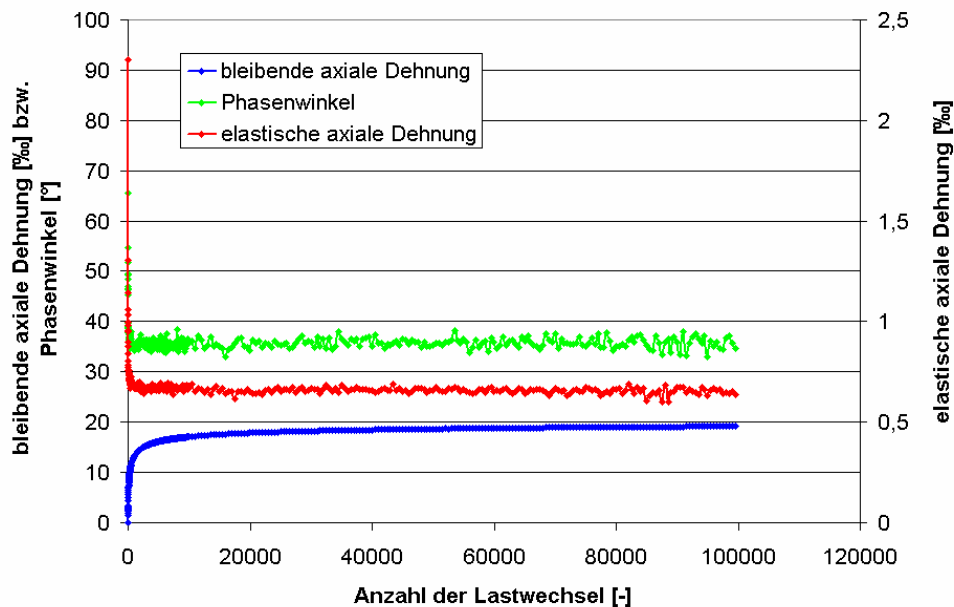


Abb. 4-48: Auswertegrößen – DSEV

4.3.4.1 Steifemodul

Um die elastische Dehnung in Form eines Verformungsmoduls auszuwerten, der aufgrund des im Versuch herrschenden inhomogenen Spannungszustandes im Probekörper nicht als absoluter Elastizitätsmodul definiert werden darf, wird diese Größe im Folgenden als Steifemodul bezeichnet (siehe Kapitel 3.1.1.6) und mit der Gleichung 3-1 berechnet.

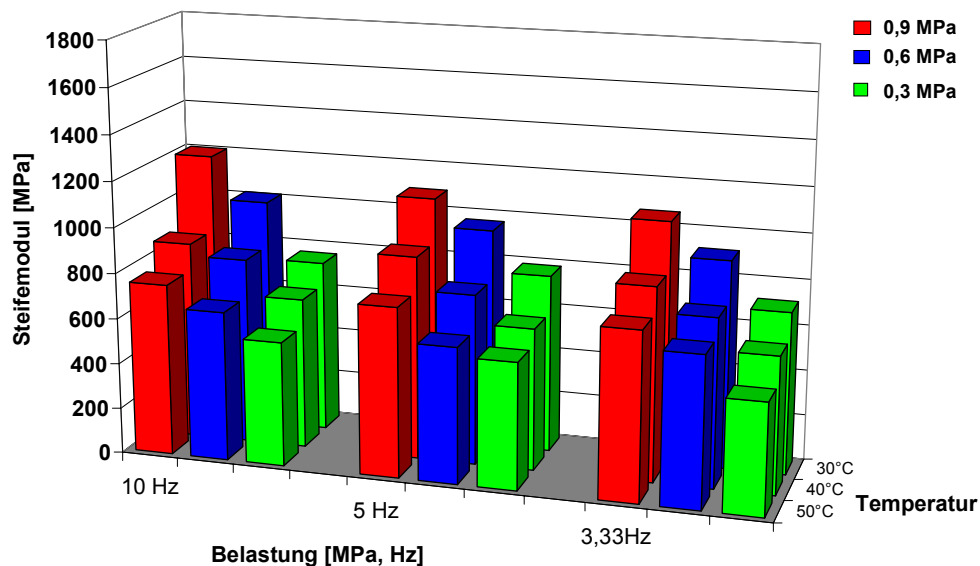


Abb. 4-49: Steifemodul – DSEV (ABi)

Die Veränderung der Prüftemperatur und der Oberspannung bewirken deutliche Unterschiede bei der Größenordnung der Steifemoduln ermittelt am ABi. Mit steigender Prüftemperatur nehmen die Werte ab. Wird die Oberspannung erhöht, steigt der Steifemodul. Ein geringer Frequenzeinfluss ist bei der Betrachtung der Mittelwerte zu erkennen. Werden allerdings die Streubereiche der Steifemoduln mit betrachtet, relativiert sich die Aussage zum Frequenzeinfluss aufgrund der geringen Differenzierung, siehe Abbildung 4-50.

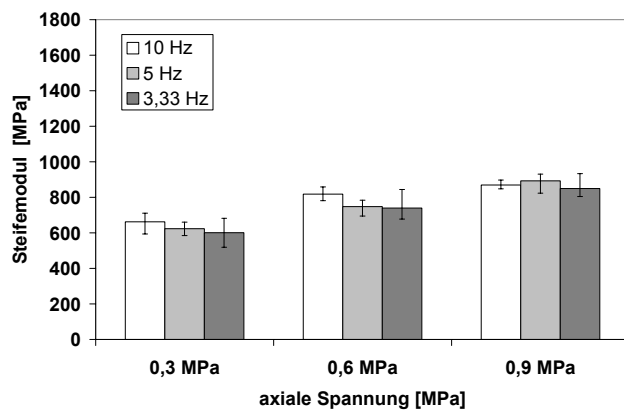


Abb. 4-50: Steifemodul – DSEV (ABi, 40°C)

Der Mischgutvergleich wurde bei einer axialen Belastung von 0,9 MPa und verschiedenen Frequenzen durchgeführt, siehe Abbildung 4-51. Danach weist die Asphalttragschichtvariante die höchsten Steifigkeiten gefolgt von der Asphaltbinder- und Asphaltbetonvariante auf.

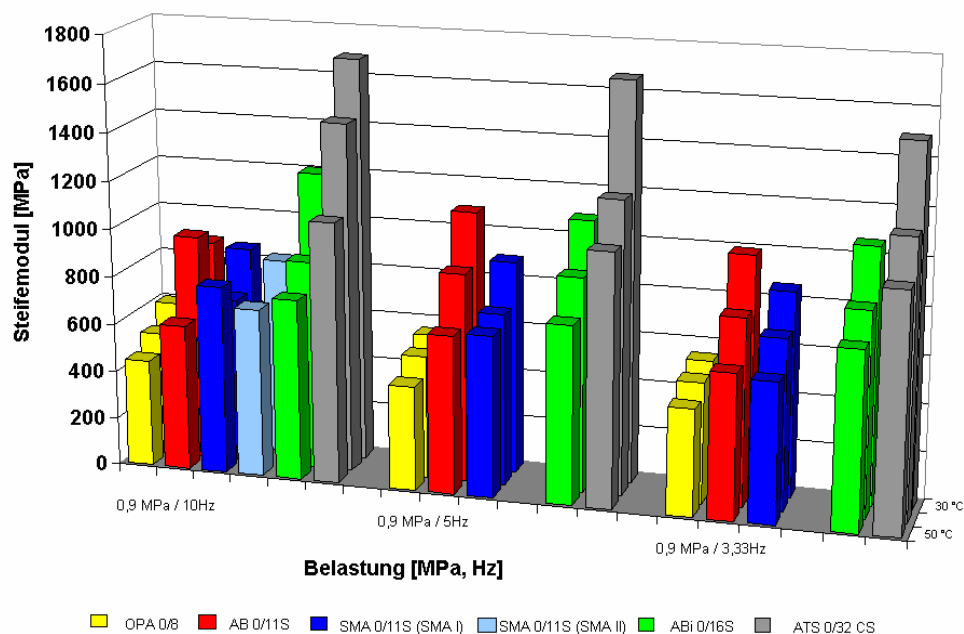


Abb. 4-51: Vergleich der Steifemoduln verschiedener Asphaltvarianten – DSEV

Die SMA I Variante besitzt bei den Versuchen bei 10 Hz höhere Steifemoduln als die SMA II Variante, die nur bei dieser Frequenz geprüft wurde. Die ermittelten Steifemoduln für die offenporige Asphaltvariante liegen deutlich unter denen der anderen Asphalte. Die Mischgutvergleiche bei den axialen Belastungen von 0,6 MPa und 0,3 MPa sind dem Anhang D zu entnehmen.

Eine funktionale Abhängigkeit kann entsprechend der Abbildung 4-27 für den absoluten Elastizitätsmodul - ermittelt mit einaxialen Druckschwellversuchen - auch für den Steifemodul der dynamischen Stempeleindringversuche berechnet werden. Diese Funktionen eignen sich aufgrund des inhomogenen Spannungszustandes im Probekörper, siehe Kapitel 3.2.3, jedoch nicht als Stoffmodelleingangsgrößen. Die gemessenen elastischen und viskoelastischen Dehnungen unter dem Laststempel bzw. die berechneten Steifemoduln lassen sich mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode, den dafür notwendigen Stoffmodellen und den Eingangsparametern für diese Stoffmodelle, die an homogen belastetem Material bestimmt werden, berechnen. Somit dienen die funktionalen Abhängigkeiten der experimentell bestimmten Steifemoduln der Validierung der FE-Berechnungen.

Da der Frequenzeinfluss auf den Steifemodul sehr gering oder gar nicht erkennbar ist, wurden im Folgenden die funktionalen Abhängigkeiten der Steifemoduln von der aufgetragenen axialen Belastung dargestellt, siehe Abbildung 4-52.

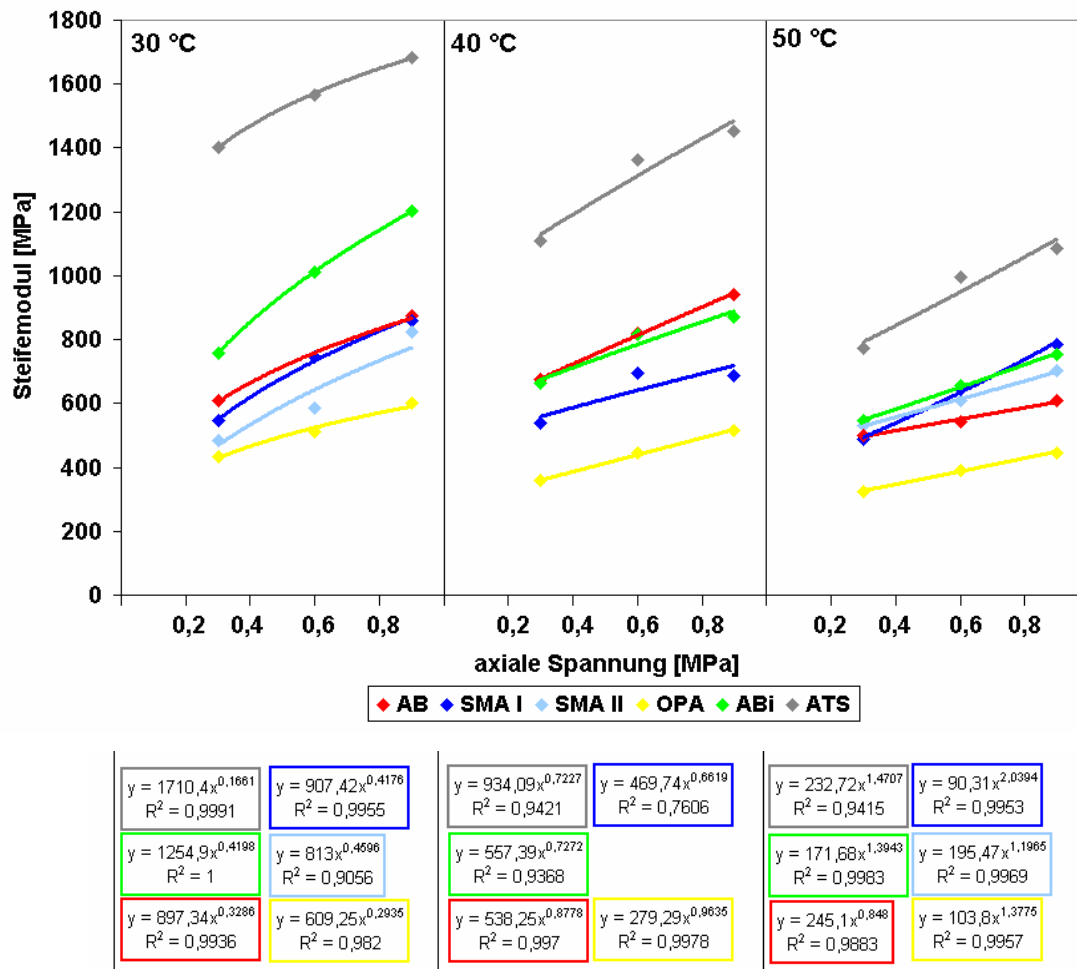


Abb. 4-52: Steifemoduln in Abhängigkeit von der Last – DSEV (10 Hz)

Deutlich erkennbar ist die Lastabhängigkeit der ermittelten Steifemoduln, die mit einem hohen Bestimmtheitsmaß mit den o. g. Potenzfunktionen beschrieben werden können. Allerdings widerspricht diese Lastabhängigkeit der Elastizitätstheorie. Ein Verformungsmodul hängt von der Temperatur und Belastungszeit ab, nicht aber von der Oberspannung.

Eine mögliche Erklärung für die festgestellte Lastabhängigkeit der hier berechneten Steifemoduln ist die Vernachlässigung der viskoelastischen Verformungen bei der Berechnung. Zur Veranschaulichung dieser Problematik wird die Gleichung für das Voigt-Kelvin-Modell (vereinfachend für eine konstante Spannungsbelastung), welches viskoelastisches Verhalten beschreibt, verwendet.

$$\varepsilon_{V.-K.}(t) = \frac{\sigma_{\text{konst}}}{E} + \left(1 - e^{-\frac{E}{\lambda}t}\right)$$

Gleichung 4-7

Die Gleichung setzt sich aus einem spannungsabhängigen und einem spannungsunabhängigen Summanden zusammen.

In der folgenden Tabelle ist der Einfluss der beiden Summanden auf die Gesamtverformung dargestellt.

Tabelle 4-4: Einfluss der einzelnen Summanden der Gleichung zur Beschreibung des Voigt-Kelvin-Modells auf die Gesamtdehnung

axial erzeugte Spannung	Gleichung zur Beschreibung des Voigt-Kelvin-Modells	
	$\frac{\sigma_{\text{konst}}}{E}$	$\left(1 - e^{-\frac{E}{\lambda}t}\right)$
0,3 MPa	0,3 / E	konstanter Wert
0,6 MPa	0,6 / E	konstanter Wert
0,9 MPa	0,9 / E	konstanter Wert

Der spannungsunabhängige Anteil nimmt bei kleiner Oberspannung (0,3 MPa) einen größeren Anteil der Gesamtdehnung ein als bei einer höheren Oberspannung (0,6 bzw. 0,9 MPa). Durch diese nicht proportional zur Laststeigerung zunehmende Gesamtdehnung und der Verwendung der Gleichung 3-1 entsteht der Eindruck, dass der Steifemodul lastabhängig ist.

4.3.4.2 Phasenwinkel - DSEV

Bei der Auswertung des Phasenwinkels konnten die gleichen Tendenzen wie bei denen mit dem einaxialen Druckschwellversuch ermittelten (siehe Kapitel 4.3.2.2) festgestellt werden, siehe Abbildung 4-53.

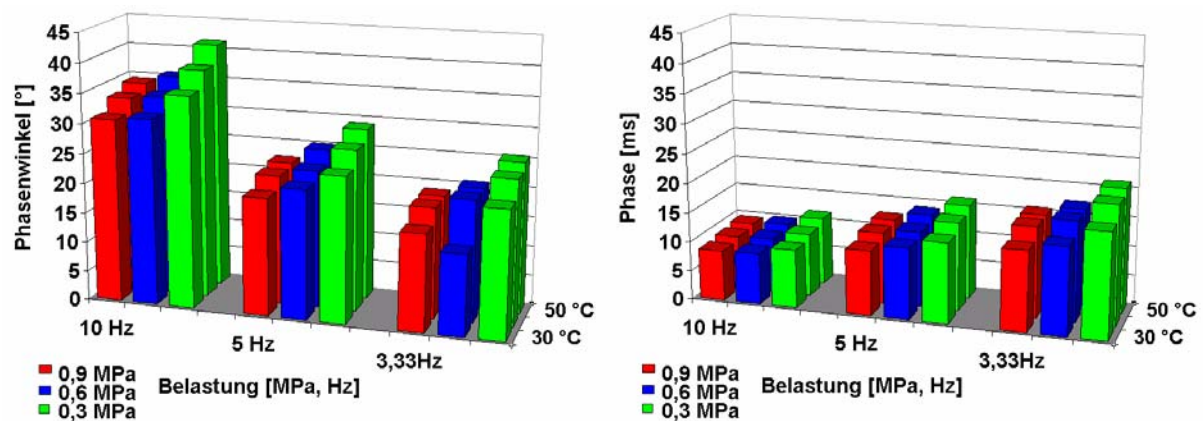


Abb. 4-53: Vergleich der Phasenwinkel und Phasen - DSEV (ABi)

Der Phasenwinkel fällt entgegen den Erkenntnissen aus Bitumenuntersuchungen mit Abnahme der Frequenz. Entsprechend der Begründung in Kapitel 4.3.2.2 für dieses Materialverhalten wird die Phasenverschiebung im Folgenden als Phase in [ms] ausgewertet.

Mit zunehmender Temperatur sinkt die Viskosität von Bitumen, so dass sich der Anteil der elastischen Eigenschaften reduziert. Demzufolge wurden bei hohen Temperaturen (50 °C) größere Phasen und bei niedrigen Temperaturen (30 °C) kleinere Phasen festgestellt.

Die Zeitspanne zwischen den Maxima der aufgetragenen Last und der resultierenden Dehnung (Phase) wird auch von der Größe der axialen Belastung beeinflusst. Mit steigender axialer Belastung wird die Phase kleiner, siehe Abbildung 4-53. Ein ähnliches Verhalten zeigt sich bei Relaxationsversuchen am Asphalt. Je größer die aufgetragene Last – die erzeugte Spannung – ist, desto schneller relaxiert bzw. reagiert das Material [Wellner, Leutner 2007], siehe Abbildung 4-54.

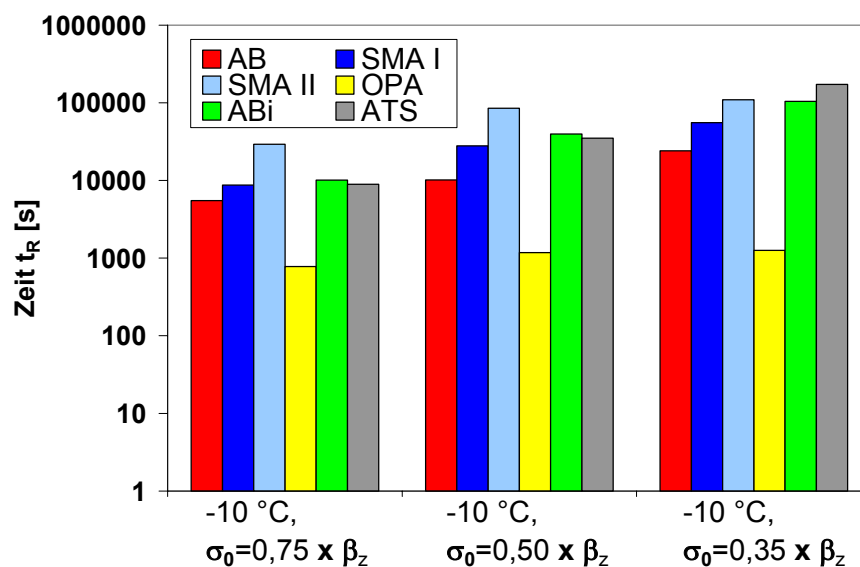


Abb. 4-54: Relaxationszeiten verschiedener Asphaltvarianten ermittelt bei -10 °C
[Wellner, Leutner 2007]

Der Vergleich der gemessenen Phasen bei einer axialen Spannung von 0,3 MPa, den drei gewählten Temperaturen und Frequenzen zeigt, dass die Asphalttragschicht von allen Asphaltvarianten die längsten Phasen aufweist, siehe Abbildung 4-55.

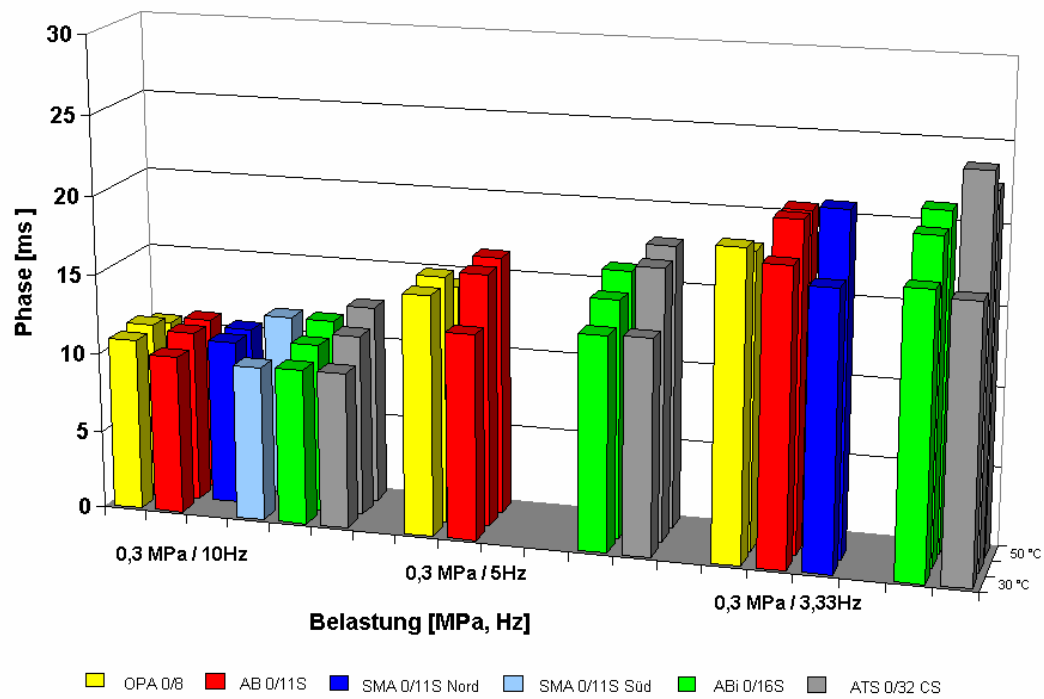


Abb. 4-55: Vergleich der Phasen unterschiedlicher Asphaltvarianten - DSEV

Eine Differenzierung der übrigen Asphaltvarianten ist aufgrund der geringen Unterschiede der gemessenen Phasen nicht möglich.

4.3.5 Aufteilung der Verformung in elastische und viskoelastische Anteile

Entsprechend den Ausführungen in Kapitel 3.1.1.5 setzt sich die durch eine sinusförmig schwellende Druckbeanspruchung hervorgerufene schwingende Dehnungsreaktion aus elastischen und viskoelastischen Verformungsanteilen zusammen. Bei den Berechnungen der absoluten Elastizitätsmoduln wurden vereinfacht die Amplituden dieser schwingenden Dehnungsreaktionen angesetzt. Um für die Stoffmodellierung präzise Eingangsgrößen für den Baustoff Asphalt zu bestimmen, werden in diesem Kapitel die schwingenden Dehnungsreaktionen - ermittelt mit schwellender Druckbeanspruchung - in elastische und viskoelastische Anteile aufgeteilt. Dazu werden im Folgenden vier Lösungsansätze vorgestellt.

4.3.5.1 Lösungsansatz - komplexer Elastizitätsmodul

Bei diesem Verfahren kann der komplexe Elastizitätsmodul mit Kenntnis des Phasenwinkels und des absoluten Elastizitätsmoduls als Vektor dargestellt und in einen Real- und Imaginäranteil unterteilt werden, siehe Kapitel 3.1.4. Entwickelt wurde diese Vorgehensweise zur Aufteilung des Elastizitätsmoduls auf der Grundlage von Zug-Druck-Versuchen (Wechselversuchen).

Werden nach diesem Verfahren beispielsweise die mit dem DSV bei 30 °C und 0,3 MPa am AB ermittelten Phasenwinkel angewandt, ergeben sich die in der Abbildung 4-56 dargestellten Anteile:

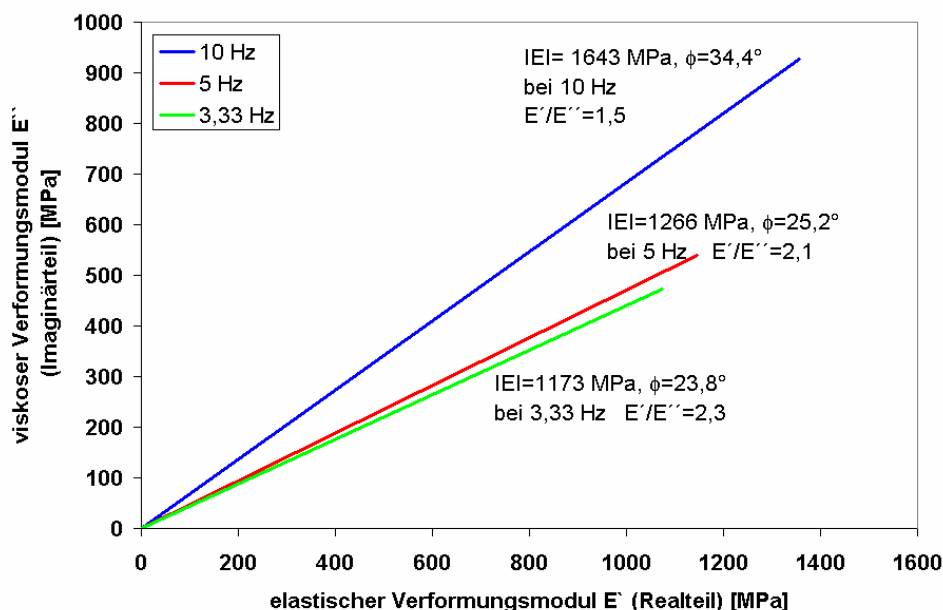


Abb. 4-56: Elastischer und viskoser Anteil des Verformungsmoduls

Das Verhältnis Realteil zu Imaginärteil E'/E'' nimmt bei den dargestellten Ergebnissen mit Abnahme der Frequenz zu und nicht wie erwartungsgemäß aufgrund der geringeren Elastizität und höheren Viskosität bei 3,33 Hz ab. Diese Unplausibilität kann mit den Erkenntnissen aus Kapitel 4.3.2.2 – dass der Phasenwinkel, ermittelt mit Schwellversuchen bei höheren Temperaturen, eine entgegen gesetzte Abhängigkeit von der Frequenz aufweist, als es bei Wechselversuchen festgestellt wurde – erklärt werden. Durch diese entgegen gesetzten Abhängigkeiten können die elastischen und viskosen Verformungsanteile von Schwellversuchen bei höheren Temperaturen nicht mit diesem Verfahren bestimmt werden.

4.3.5.2 Lösungsansatz - Hystereseschleifen

Bei elastischen Dehnungen handelt es sich um Verformungen, die unter Last spontan entstehen und die sich nach der Entlastung wieder vollständig zurück bilden. Mathematisch kann dieses Verhalten mit der Eigenschaft der Hookschen Feder beschrieben werden. Die viskoelastischen Dehnungen entstehen zeitverzögert, bilden sich aber auch vollständig wieder zurück und können mit den Gleichungen des Voigt-Kelvin-Elementes berechnet werden. Werden beide rheologischen Elemente mit einem sinusförmigen Lastimpuls beansprucht und wird die aufgebrachte Spannung über der erzeugten Dehnung aufgetragen, ergeben sich folgende Graphen, siehe Abbildung 4-57.

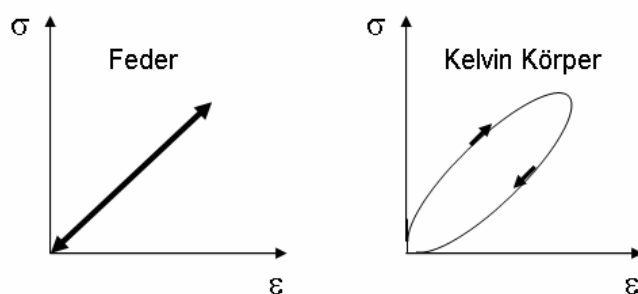


Abb. 4-57: Spannungs-Dehnungs-Beziehung - Feder und Voigt-Kelvin-Element

Infolge des parallel geschalteten Dämpfers im Voigt-Kelvin-Element, der das viskose Materialverhalten widerspiegelt, entstehen im Gegensatz zum Federelement Hystereseschleifen. Hysterese bezeichnet das Fortdauern einer Wirkung nach Wegfall ihrer Ursache. Werden die am Asphalt gemessenen Spannungs-Dehnungs-Beziehungen wie beschrieben dargestellt, ergeben sich ebenfalls Hystereseschleifen.

Um die elastischen und viskosen Verformungsanteile zu unterscheiden, wurde folgende Theorie aufgestellt, siehe Abbildung 4-58.

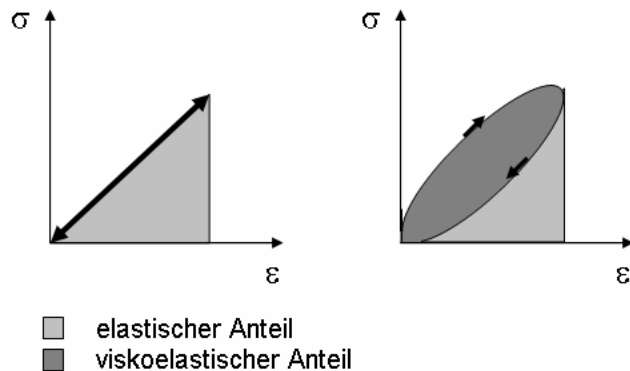


Abb. 4-58: Theorie zur Unterscheidung von elastischen und viskoelastischen Verformungsanteilen

Danach wird das Verhältnis der Flächen, die von der Spannungs-Dehnungs-Beziehung und der x-Achse eingegrenzt werden, bewertet. Zu unterscheiden sind dabei die Fläche in der Hystereseschleife A_V , die als viskoelastischer Anteil definiert wird, und die Fläche A_E , die von dem abfallenden Teil der Hystereseschleife und der x-Achse gebildet und als elastischer Anteil bezeichnet wird. Entsprechend dem Verhältnis dieser Flächen zueinander kann die gemessene Dehnung unterteilt werden. Bei dieser Vorgehensweise ist zu beachten, dass sich nach jedem Lastwechsel ein bleibender Dehnungsanteil im Probekörper einstellt und die Hystereseschleifen dadurch parallel zur x-Achse verschoben werden, siehe Abbildung 4-59.

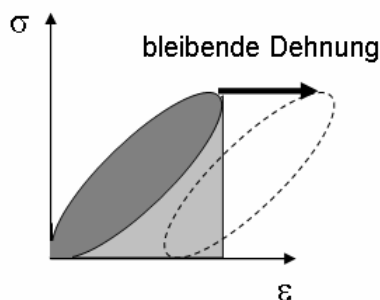


Abb. 4-59: Bleibende Dehnung - Hystereseschleifen

Da bei dieser Betrachtung die elastischen und viskoelastischen Dehnungen relevant sind, werden für jeden Lastwechsel die bleibenden Dehnungen auf Null gesetzt, so dass es zu keiner Parallelverschiebung der Hystereseschleifen kommt.

Wird der sinusförmige Lastimpuls mit einer kleineren Frequenz d.h. mit einer längeren Lasteinwirkungsdauer aufgebracht, führt dies zu größeren Dehnungen und damit zu einer flacher verlaufenden Schleife, siehe Abbildung 4-60.

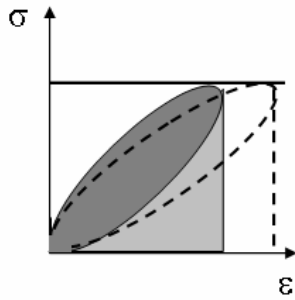


Abb. 4-60: Einfluss der Frequenz auf den Verlauf der Hystereseschleife

Im Folgenden wurde anhand von gemessenen Spannungs-Dehnungs-Beziehungen, - ermittelt mit einaxialen Druckschwellversuchen - geprüft, ob mit der Anwendung dieser Theorie plausible elastische und viskoelastische Dehnungsanteile bestimmt werden können. Dazu wurden die entsprechenden Flächen A_V und A_E mit der Gleichung 4-8 berechnet.

$$A_V \text{ bzw. } A_E = \frac{1}{2} \cdot ((\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \cdot (\sigma_1 + \sigma_2) + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3) \cdot (\sigma_2 + \sigma_3) + \dots + (\varepsilon_n - \varepsilon_1) \cdot (\sigma_n + \sigma_1))$$

Gleichung 4-8

Bei einer Reduzierung der Belastungsfrequenz wird eine Zunahme des Verhältnisses der Fläche A_V innerhalb der Hystereseschleife zu der Fläche A_E , die von dem abfallenden Teil der Hystereseschleife und der x-Achse gebildet wird, erwartet.

Eine Zunahme des Verhältnisses der Fläche A_V innerhalb der Hystereseschleife zu der Fläche A_E , die von dem abfallenden Teil der Hystereseschleife und der x-Achse gebildet wird, ist bei einer Reduzierung der Belastungsfrequenz zu erwarten. Je niedriger die Frequenz ist, umso stärker werden die viskosen Eigenschaften des Materials angesprochen. Die Fläche, die den elastischen Anteil repräsentiert, muss unverändert bleiben, da nur die Frequenz und nicht die erzeugte Oberspannung variiert wird.

Die je Lastwechsel berechneten Flächen innerhalb der Hysteresekurven wurden aus den Versuchsdaten der einaxialen Druckschwellversuche ermittelt. In Abbildung 4-61 sind beispielhaft die Flächen in den Hystereseschleifen bei 40 °C und 0,45 MPa dargestellt.

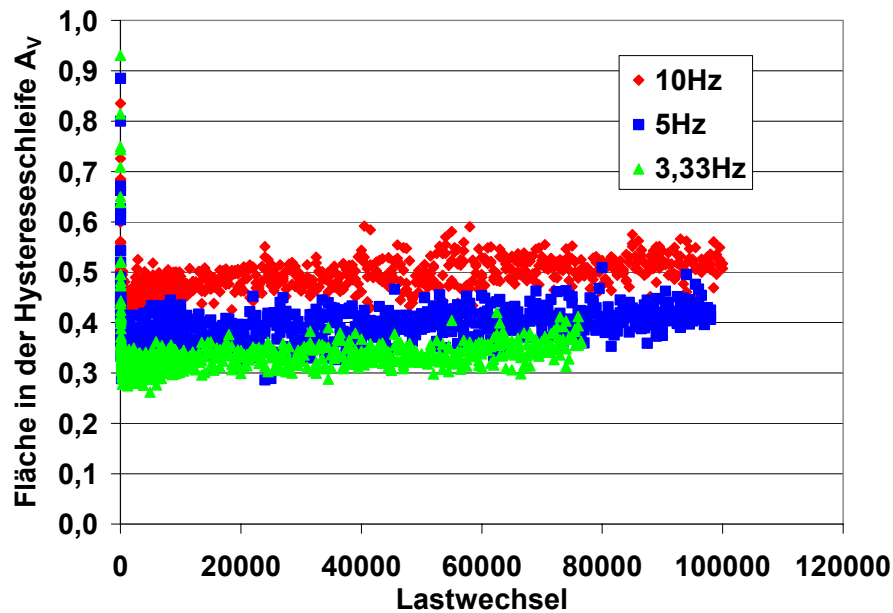


Abb. 4-61: Berechnete Fläche A_v in der Hystereseschleife

Abweichend zu der vorab aufgestellten Theorie wurden größere Flächen bei höheren Frequenzen und kleinere Flächen bei niedrigeren Frequenzen ermittelt. Diese auf den ersten Blick unplausiblen Ergebnisse, die sich bei anderen Prüftemperaturen und Oberspannungen wiederholten, können mit folgender Überlegung und der Abbildung 4-62 erklärt werden:

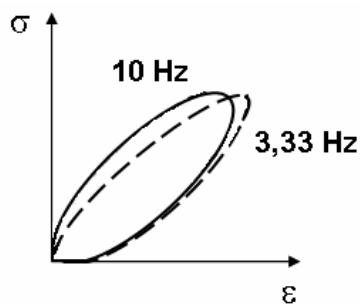


Abb. 4-62: Hystereseschleifen bei unterschiedlichen Frequenzen, ermittelt mit Versuchen unter Druckschwellbelastung

Der ansteigende Ast der Hystereseschleife wird mit abnehmender Frequenz flacher, da aufgrund der längeren Belastungszeit größere Dehnungen entstehen. Dies ist auch die Ursache für die Verschiebung des Wendepunktes der Hystereseschleife bei niedrigeren Frequenzen. Die Entlastung, die von dem abfallenden Ast der Hystereseschleife beschrieben wird, kann sich bei Druckschwellversuchen „frei“ einstellen. Die Rückverformung wird nicht wie bei Wechselversuchen (Zug-Druck-Belastung)

infolge einer Zugkraft aufgezwungen, wodurch sich die Fläche in der Hystereseschleife und damit der viskose Anteil vergrößert, siehe Abbildung 4-63.

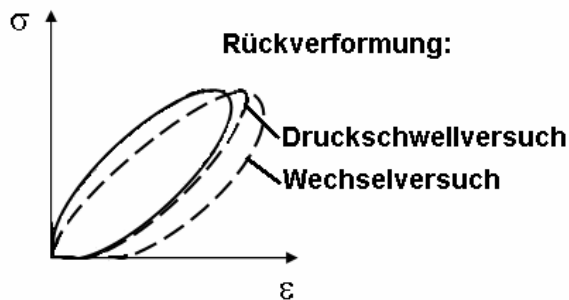


Abb. 4-63: Hystereseschleifen Druckschwellversuch - Wechselversuch

Da die „freie“ Rückverformung von der Zeit abhängig ist, diese Größe sich aber nicht in dem Diagramm darstellen lässt, liegen die Entlastungskurven bei den verschiedenen Frequenzen sehr nahe beieinander. Eine Unterteilung der elastischen und viskoelastischen Anteile ist mit dieser Vorgehensweise bei Druckschwellversuchen nicht zielführend.

4.3.5.3 Lösungsansatz - analytisch

Bei diesem Lösungsansatz ist es das Ziel, die gemessene Verformungskurve in Kurven der elastischen und der viskoelastischen Verformung unter Berücksichtigung der Zeit zu unterteilen, siehe Abbildung 4-64.

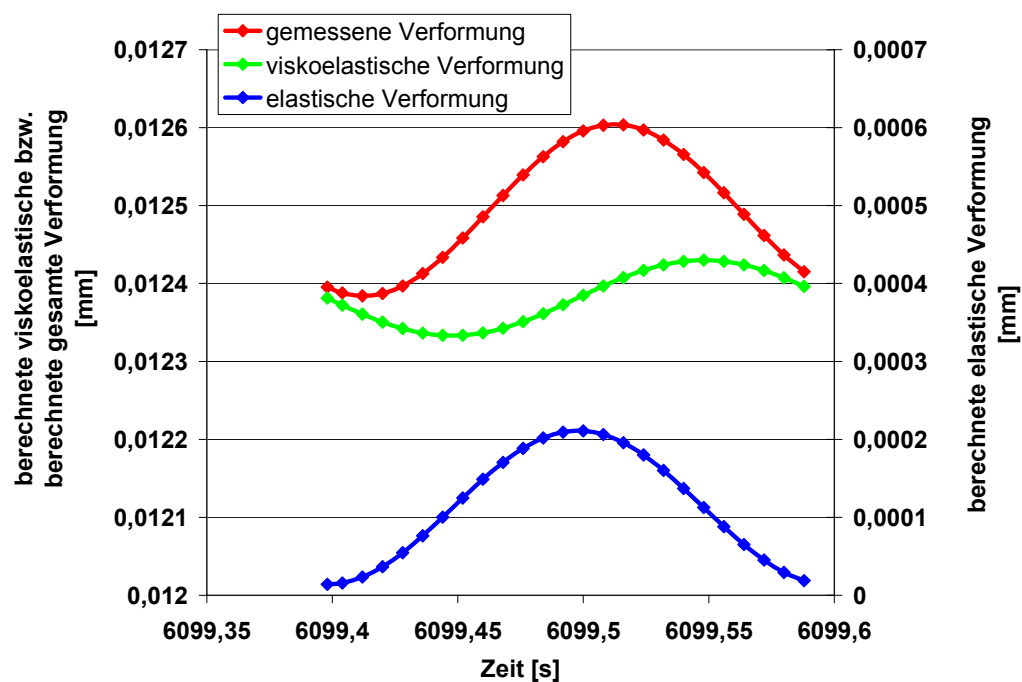


Abb. 4-64: Unterteilung der gemessenen Verformungskurve in eine elastische und viskoelastische Verformungskurve

Um diese rechnerisch zu ermitteln, wird der elastische Anteil mit der Gleichung für eine elastische Feder und der viskoelastische mit der Gleichung des Voigt-Kelvin-Elementes berechnet und mittels Minimierung der Fehlerquadratsumme an die gemessenen Dehnungsschwingung angepasst. Für den sinusförmigen Spannungsimpuls σ im Probekörper wird folgende Funktion eingesetzt, deren Parameter a , b , f , Φ durch die Vorgabe der zu erzeugenden Spannung und Frequenz - z.B. beim einaxialen Druckschwellversuch 0,3 MPa, 5 Hz - bereits festgelegt sind.

$$\sigma = a \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \Phi) + b \quad \text{Gleichung 4-9}$$

mit

- σ = Spannung [MPa]
- a = Amplitude des sinusförmigen Spannungsimpulses [MPa]
- f = Frequenz [Hz]
- t = Zeit [s]
- Φ = Phase [rad]
- b = Ausgangsspannung zum Zeitpunkt $t = 0$

Berechnung der elastischen Verformung

Die elastische Verformung wird mit der Gleichung der Hookschen Feder und der Gleichung für den sinusförmigen Spannungsimpuls berechnet.

Somit ergibt sich mit dem Federelement

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad \text{Gleichung 4-10}$$

die Gleichung 4-11.

$$\varepsilon_1 = \frac{a}{E_1} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \Phi_1) + \frac{b}{E_1} \quad \text{Gleichung 4-11}$$

mit

- ε_1 = Dehnung des Federelementes [‰]
- a = Amplitude des sinusförmigen Spannungsimpulses [MPa]
- E_1 = E-Modul der Feder [MPa]
- f = Frequenz [Hz]
- t = Zeit [s]
- Φ_1 = Phasenwinkel der Feder [rad] = 0
- b = Ausgangsspannung zum Zeitpunkt $t = 0$

Da die Feder linear elastisch reagiert und keine Phasenverschiebung erzeugt, ist der Phasenwinkel Φ_1 gleich Null.

Berechnung der viskoelastischen Verformung

Das Voigt-Kelvin-Element wird durch die Parallelschaltung von Feder und Dämpfer gebildet und mit folgenden Gleichungen beschrieben.

$$\sigma = \varepsilon \cdot E + \dot{\varepsilon} \cdot \lambda \quad \text{Gleichung 4-12}$$

mit

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon} &= \text{Dehnungsrate [\%/n]} \\ \sigma &= \text{Spannung [MPa]} \\ \varepsilon &= \text{Dehnung [\%]} \\ E &= \text{E-Modul der Feder [MPa]} \\ \lambda &= \text{Viskosität der Newtonschen Flüssigkeit des Dämpfers [MPa s]} \end{aligned}$$

Aufgelöst nach der Dehnung folgt aus der Gleichung 4-12 die Gleichung 4-13.

$$\varepsilon(t) = e^{-\frac{E}{\lambda}t} \cdot \left(c + \int_0^t \frac{\sigma}{\lambda} \cdot e^{\frac{E}{\lambda}t} dt \right) \quad \text{Gleichung 4-13}$$

Wird in die Gleichung 4-13 die Gleichung 4-9 eingesetzt, ergibt sich die folgende Gleichung.

$$\varepsilon_2 = e^{-\frac{E_2}{\lambda}t} \cdot \left(\frac{a \cdot 2 \cdot \pi \cdot f}{\lambda \cdot \left(\left(\frac{E_2}{\lambda} \right)^2 + (2 \cdot \pi \cdot f)^2 \right)} - \frac{b}{E_2} \right) + \frac{b}{E_2} + \frac{a}{\lambda \cdot \sqrt{\left(\frac{E_2}{\lambda} \right)^2 + (2 \cdot \pi \cdot f)^2}} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \Phi_2)$$

Gleichung 4-14

mit

$$\begin{aligned} \varepsilon_2 &= \text{Dehnung des Voigt-Kelvin-Elementes [\%]} \\ E_2 &= \text{E-Modul der Feder des Voigt-Kelvin-Elementes [MPa]} \\ \lambda &= \text{Viskosität der Newtonschen Flüssigkeit des Dämpfers [MPa s]} \\ t &= \text{Zeit [s]} \\ a &= \text{Amplitude des sinusförmigen Spannungsimpulses [MPa]} \\ b &= \text{Ausgangsspannung zum Zeitpunkt } t = 0 \\ f &= \text{Frequenz [Hz]} \\ \Phi_2 &= \text{Phasenwinkel des Voigt-Kelvin-Elementes [rad]} \end{aligned}$$

Die Gesamtverformung bzw. Dehnung setzt sich aus den beiden Dehnungsanteilen zusammen.

$$\varepsilon_{\text{gesamt}} = \varepsilon_{\text{Feder}} + \varepsilon_{\text{Voigt-Kelvin}} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \quad \text{Gleichung 4-15}$$

Mathematisch bedeutet dies eine Überlagerung von zwei Sinusschwingungen mit gleicher Frequenz, unterschiedlichen Phasen und unterschiedlichen Amplituden. Die allgemeine Formel dafür lautet:

$$\varepsilon_{\text{ges}}(t) = \sqrt{(x \cdot \cos\Phi_x + y \cdot \cos\Phi_y)^2 + (x \cdot \sin\Phi_x + y \cdot \sin\Phi_y)^2} \cdot \sin\left(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \arctan\left(\frac{x \cdot \sin\Phi_x + y \cdot \sin\Phi_y}{x \cdot \cos\Phi_x + y \cdot \cos\Phi_y}\right)\right)$$

$$\text{Gleichung 4-16}$$

mit

x = Funktion der ersten Sinusschwingung

y = Funktion der zweiten Sinusschwingung

Φ_x = Phasenwinkel der ersten Sinusschwingung

Φ_y = Phasenwinkel der zweiten Sinusschwingung

Angewendet auf diese Problemstellung ergeben sich für die Variablen der Gleichung 4-16 folgende Werte.

$$x = \varepsilon_{\text{Feder}} = \varepsilon_1 = \frac{a}{E_1} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \Phi_1)$$

$$y = \varepsilon_{\text{Voigt-Kelvin}} = \varepsilon_2 = \frac{a}{\lambda \cdot \sqrt{\left(\frac{E_2}{\lambda}\right)^2 + (2 \cdot \pi \cdot f)^2}} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \Phi_2)$$

mit

$$\Phi_x = \Phi_1 = \Phi_{\text{Feder}} = 0$$

$$\Phi_y = \Phi_2 = \Phi_{\text{Voigt-Kelvin}}$$

Für die Variable x wird die Gleichung 4-11 eingesetzt. Da im Folgenden die Schwingung und nicht die Nulllage der Schwingung untersucht wird, wird der zweite Summand b/E_1 zu Null gesetzt.

Für die Variable y vereinfacht sich die Gleichung 4-14 in der Hinsicht, dass der erste Summand nach einer bestimmten Zeitdauer gegen Null strebt. Rheologisch betrachtet bedeutet dies, dass das Voigt-Kelvin-Element sich im „eingeschwungenen“ Zustand, der Phase 2 der Impulskriechkurve, befindet.

Um die Gleichung 4-16 zu lösen, sind die Unbekannten E_2 , E_1 , λ und Φ_2 zu bestimmen:

Für die Unbekannte E_2 kann der Wert direkt aus den Versuchsdaten abgeleitet werden. Das Voigt-Kelvin-Element besitzt im „eingeschwungenen“ Zustand einen parallelen Verlauf zur Zeitachse, siehe Abbildung 4-65.

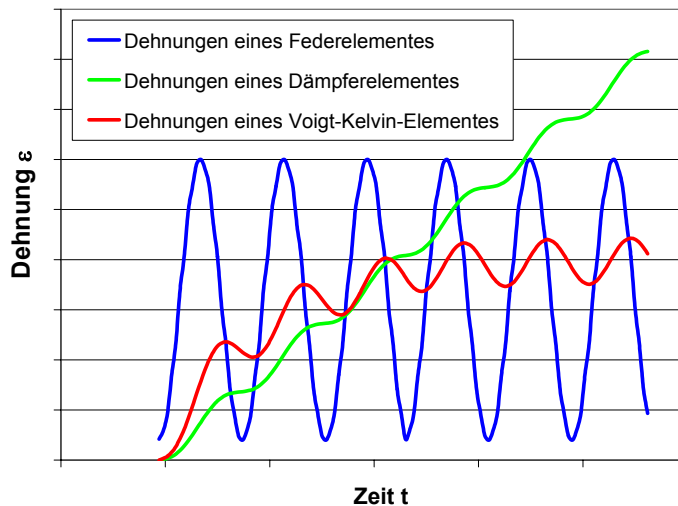


Abb. 4-65: Dehnungen rheologischer Elemente

Übertragen auf eine im Versuch ermittelte Dehnungskurve bedeutet dies, dass der Dehnungszuwachs von dieser Dehnungskurve subtrahiert werden muss, um dem Verlauf des Voigt-Kelvin-Elementes – parallel zur Zeitachse – zu entsprechen, siehe Abbildung 4-66.

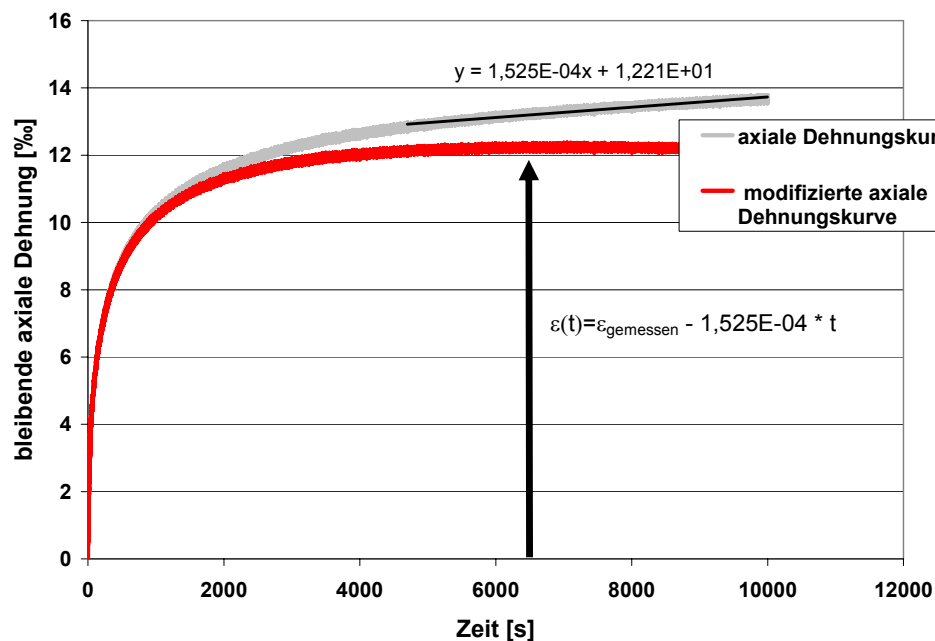


Abb. 4-66: Subtraktion des Dehnungszuwachses von der Dehnungskurve

Wird zu einem bestimmten Zeitpunkt ein Wert dieser Dehnungskurve ermittelt, lässt sich die Unbekannte E_2 mit der Gleichung 4-14 für dieses Beispiel wie folgt berechnen.

$$\varepsilon_2 = e^{-\frac{E_2}{\lambda} \cdot t} \cdot \left(\frac{a \cdot 2 \cdot \pi \cdot f}{\lambda \cdot \left(\left(\frac{E_2}{\lambda} \right)^2 + (2 \cdot \pi \cdot f)^2 \right)} - \frac{b}{E_2} \right) + \frac{b}{E_2} + \frac{a}{\lambda \cdot \sqrt{\left(\frac{E_2}{\lambda} \right)^2 + (2 \cdot \pi \cdot f)^2}} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \Phi_2)$$

$$\Rightarrow \varepsilon_2 = \frac{b}{E_2} = \varepsilon_{\text{gemessen}} - 1,525 \cdot 10^{-4} \cdot t$$

$$\Rightarrow E_2 = \frac{b}{\varepsilon_{\text{gemessen}} - 1,525 \cdot 10^{-4} \cdot t}$$

Für die Unbekannten E_1 , λ , ϕ_2 existieren lediglich nur zwei Bedingungen. Der erste Faktor der Gleichung 4-16 entspricht der gemessenen Amplitude ($\Delta\varepsilon/2$) und der Wert für den arc tan kann der gemessenen Phase gleichgesetzt werden.

$$\varepsilon_{\text{ges}}(t) = \underbrace{\sqrt{(x \cdot \cos\Phi_X + y \cdot \cos\Phi_Y)^2 + (x \cdot \sin\Phi_X + y \cdot \sin\Phi_Y)^2}}_{\text{Amplitude}} \cdot \sin \left(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \underbrace{\arctan \left(\frac{x \cdot \sin\Phi_X + y \cdot \sin\Phi_Y}{x \cdot \cos\Phi_X + y \cdot \cos\Phi_Y} \right)}_{\text{Phase}} \right)$$

Aufgrund der fehlenden letzten Bedingung können die Unbekannten nicht eindeutig bestimmt werden. Eine Lösung der Gleichung 4-16 ist somit mit dieser Vorgehensweise zunächst nicht möglich.

In einem weiteren Ansatz, diese Gleichung analytisch zu lösen, sind entsprechend der Anzahl der Unbekannten Stützpunkte der Dehnungsschwingung festzulegen und über diese Werte dann die Unbekannten zu bestimmen. Dieser Ansatz wurde allerdings im Rahmen der Arbeit aufgrund der Komplexität der Gleichung nicht weiter verfolgt.

4.3.5.4 Lösungsansatz - iterativ

Eine weitere Möglichkeit die gemessenen Dehnungsschwingungen in elastische und viskoelastische Anteile zu unterteilen, ist eine iterative Bestimmung der Parameter der Gleichungen für das Feder- und das Voigt-Kelvin-Element mit Hilfe des Programms Excel. Dabei werden der elastische Anteil mit der Gleichung 4-10 und der

viskoelastische Anteil mit der Gleichung 4-12 bestimmt. Die iterativen Berechnungsschritte können der Tabelle 4-5 entnommen werden.

Tabelle 4-5: Berechnungsschritte bei der iterativen Berechnung

Δt [s]	σ [MPa]	ε Feder	$\dot{\varepsilon}$ Voigt-Kelvin	ε Voigt-Kelvin	ε gesamt
Δt_1	$\sigma(\Delta t_1)$	$= \sigma(\Delta t_1) / E_1$	-	Vorgabe $= b / E_2$	$= \varepsilon_{\text{Feder}} + \varepsilon_{\text{VoigtKelvin}}$
Δt_2	$\sigma(\Delta t_2)$	$= \sigma(\Delta t_2) / E_1$	$= \sigma(\Delta t_2) / \lambda - E_2 / \lambda * \varepsilon(\Delta t_1)$	$= \dot{\varepsilon} * \Delta t_2 + \varepsilon(\Delta t_1)$	$= \varepsilon_{\text{Feder}} + \varepsilon_{\text{VoigtKelvin}}$
...

Die sinusförmigen Spannungsschwingungen werden in äquidistante Abstände je Schwingung unterteilt. Da sich die Spannungen von Abschnitt zu Abschnitt ändern, werden für jeden Abschnitt die elastische und die viskoelastische Dehnung berechnet. Bei der Berechnung der viskoelastischen Dehnung mit dem Voigt-Kelvin-Element ist eine Vorgabe als Startwert notwendig, um rheologisch betrachtet im Dämpfer einen „eingeschwungenen“ Zustand zu simulieren und somit einen parallelen Dehnungsverlauf zur Zeitachse zu erzeugen, siehe Abbildung 4-67.

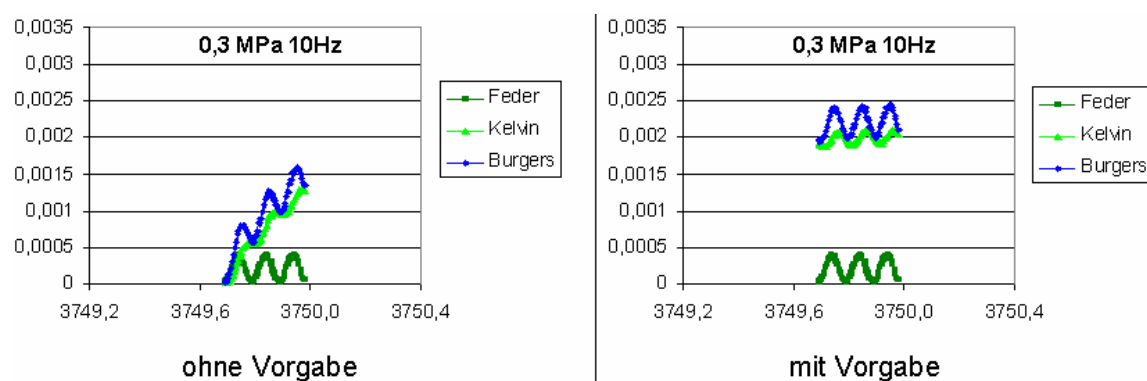


Abb. 4-67: Iterative Berechnung ohne Vorgabe und mit Vorgabe eines Startwertes

Die berechneten Gesamtdehnungen werden den gemessenen Dehnungen mit Hilfe der Solver - Funktion der Software Excel und den Variablen E_1 , E_2 und λ iterativ angenähert. Aus Speicherkapazitätsgründen ist es nicht sinnvoll für jeden Lastwechsel eines Versuches die Dehnungsreaktion aufzuzeichnen. Es werden in bestimmten Abständen (alle 500 Lastwechsel, nach 20.000 Lastwechseln alle 1.000 Lastwechsel) jeweils drei aufeinander folgende Dehnungs- und Spannungsschwingungen gespeichert. Da es sich bei den iterativ zu bestimmenden Größen um Materialparameter handelt, werden konstante Werte für E_1 , E_2 und λ je Prüftemperatur angenommen. Die Dehnungsschwingungen, ermittelt bei unterschiedlichen Oberspan-

nungen und Frequenzen, werden parallel mit denselben Variablen approximiert, siehe Abbildung 4-68.

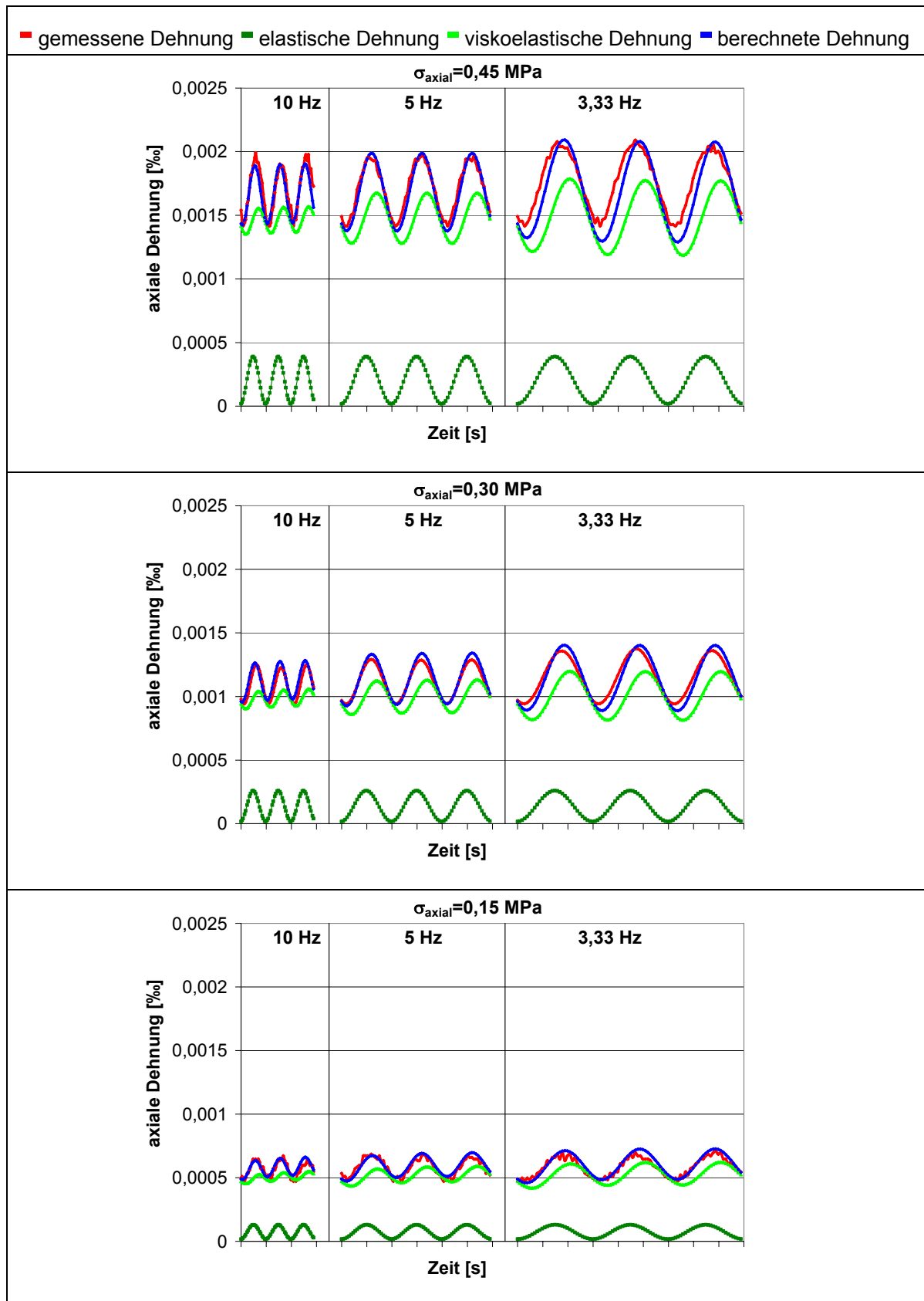


Abb. 4-68: Iterative Berechnung der elastischen und viskoelastischen Anteile- DSV

Die rote Kurve, gemessene Dehnung, wird von der blauen Kurve, berechnete Dehnung, überdeckt. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung von Messung zu Berechnung. Die berechnete Kurve setzt sich aus zwei Anteilen zusammen, die hell- und dunkelgrün dargestellt sind. Die dunkelgrüne Kurve ist der berechnete elastische Dehnungsanteil und die hellgrüne der berechnete viskoelastische Anteil.

Der Lasteinfluss ist deutlich anhand der elastischen Dehnungen zu erkennen. Mit steigender axialer Spannung steigen die Amplituden der dunkelgrünen Kurve. Das viskoelastische Materialverhalten wird von der Frequenz maßgeblich beeinflusst. Eine Zunahme der Amplituden der hellgrünen Kurven ist mit abnehmender Frequenz bzw. zunehmender Lasteinwirkungsdauer zu erkennen.

Die iterative Bestimmung der Parameter E_1 , E_2 und λ liefert keine eindeutig mathematisch bestimmbare Lösung, sondern vielmehr eine Näherungslösung.

Werden allerdings die selben Parameter parallel an mehreren Dehnungskurven, die bei unterschiedlichen Beanspruchungskombinationen ermittelt wurden, iterativ bestimmt, wird die Lösung weiter eingegrenzt und nähert sich dadurch einer eindeutig mathematisch bestimmbaren an.

4.4 BLEIBENDE VERFORMUNGEN

Die akkumulierte bleibende Dehnungskurve gliedert sich, wie in Kapitel 3.2.2 beschrieben, in drei Phasen. Für die Ermittlung von Materialkennwerten ist der Kurvenverlauf in der ersten und zweiten Phase von Bedeutung. In der dritten Phase erfolgt die Zerstörung des Probekörpers und es können keine Aussagen zum Materialverhalten in situ getroffen werden.

Ein Wendepunkt in der Spannungs-Dehnungskurve, der einen charakteristischen Punkt für die Bestimmung der Dehnung bzw. der Dehnungsrate darstellt, konnte in dieser Arbeit mit dynamischen Stempeleindringversuchen nicht ermittelt werden. Bei den resultierenden Dehnungskurven aus den dynamischen Triaxial- und einaxialen Druckschwellversuchen hängt das Auftreten eines Wendepunktes von den jeweiligen Prüfbedingungen ab.

Um die Dehnungskurven mit und ohne Wendepunkt vergleichen zu können, wurden weder die Lastwechselzahl bis zum Wendepunkt noch die Dehnung und Dehnungsrate im Wendepunkt als maßgebende Kriterien herangezogen, sondern die bleibende axiale Dehnung nach 16.000 Lastwechseln und die Dehnungsrate im Bereich vom 10.000 bis zum 16.000 Lastwechsel als maßgebend festgelegt. Nach 16.000 Lastwechseln liegen die Dehnungskurven aller Prüfkombinationen und Prüfverfahren innerhalb der zweiten Phase, in der eine volumenkonstante Formänderung stattfindet. Zusätzlich wurden die bleibenden axialen Dehnungen und Dehnungsraten, ermittelt mit Triaxialversuchen und dynamischen Stempeleindringversuchen, nach 100.000 Lastwechseln ausgewertet.

Um nicht nur punktuell die ermittelten Dehnungen zu bewerten, werden in Kapitel 4.4.5 die Dehnungsverläufe mit unterschiedlichen mathematischen Ansätzen approximiert. Über die Faktoren und Exponenten der verwendeten Gleichungen sollen Abhängigkeiten bezüglich der Prüfbedingungen gefunden werden, um Aussagen über das Verformungsverhalten treffen zu können.

Als weiteres performance orientiertes Prüfverfahren wurde der Spurbildungsversuch jedoch ohne Variation der Prüfbedingungen durchgeführt. Es ist zu untersuchen, ob hinsichtlich der Beurteilung des Verformungswiderstandes der untersuchten Asphalte mit diesem Prüfverfahren ähnliche Tendenzen wie mit den übrigen in dieser Arbeit untersuchten Prüfverfahren ermittelt werden.

4.4.1 Einaxialer Druckschwellversuch – bleibende Verformung

Die bleibenden axialen Dehnungen nach 16.000 Lastwechseln sowie die Dehnungsraten im Bereich vom 10.000 bis zum 16.000 Lastwechsel ermittelt bei 30 °C am AB sind in der folgenden Abbildung dargestellt.

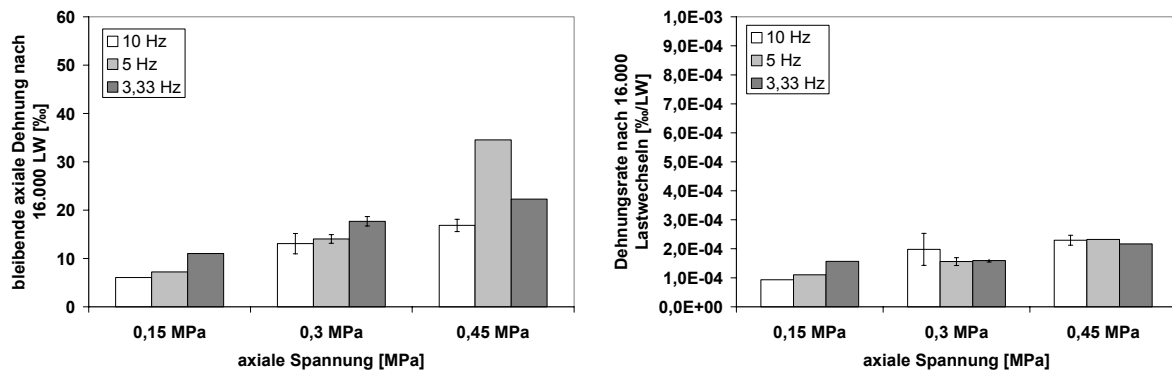


Abb. 4-69: Vergleich der bleibenden axialen Dehnungen nach 16.000 LW sowie der Dehnungsraten - DSV (AB, 30°C)

Mit steigender axialer Spannung nehmen die bleibenden axialen Dehnungen sowie die Dehnungsraten zu. Der Frequenzeinfluss ist deutlich geringer als der Lasteinfluss. Mit zunehmender Frequenz sinken die bleibenden axialen Dehnungen. Die Dehnungsraten ermittelt bei einer Oberspannung von 0,3 und 0,45 MPa lassen keine eindeutige Tendenz der Frequenz erkennen. Wird die Prüftemperatur auf 40 °C erhöht, steigen sowohl die axialen Dehnungen als auch die Dehnungsraten, siehe Abbildung 4-70.

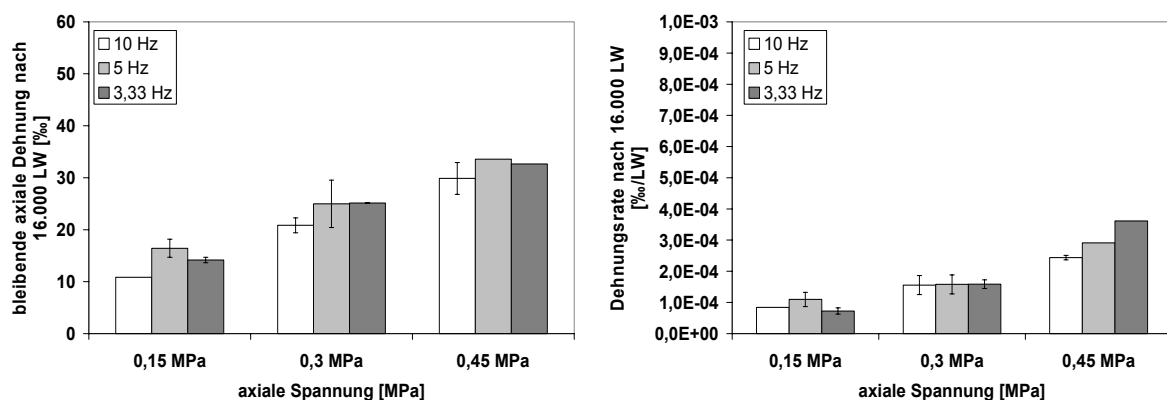


Abb. 4-70: Vergleich der bleibenden axialen Dehnungen nach 16.000 LW sowie der Dehnungsraten - DSV (AB, 40°C)

Bei den Versuchen mit einer Prüftemperatur von 50 °C ist eine deutliche Erhöhung der Dehnungsrate zu erkennen, siehe Abbildung 4-71.

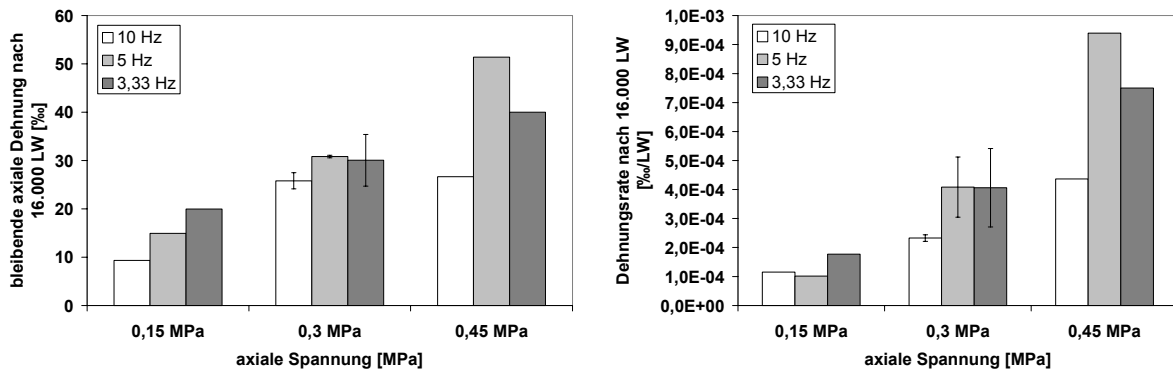


Abb. 4-71: Vergleich der bleibenden axialen Dehnungen nach 16.000 LW sowie der Dehnungsraten – DSV (AB, 50°C)

Die Ergebnisse der bleibenden axialen Dehnung nach 16.000 Lastwechseln sowie die Dehnungsraten ermittelt an den weiteren im Prüfumfang enthaltenen Asphalten sind dem Anhang B zu entnehmen.

Ein Vergleich der bleibenden axialen Dehnung der verschiedenen Asphalte nach 16.000 Lastwechseln bei unterschiedlichen Prüfkombinationen ist in den Abbildungen 4-72 und 4-73 zu sehen. Mit der offenporigen Asphaltvariante wurden aus den in Kapitel 3.2.2.1 beschriebenen Gründen keine einaxialen Druckschwellversuche durchgeführt.

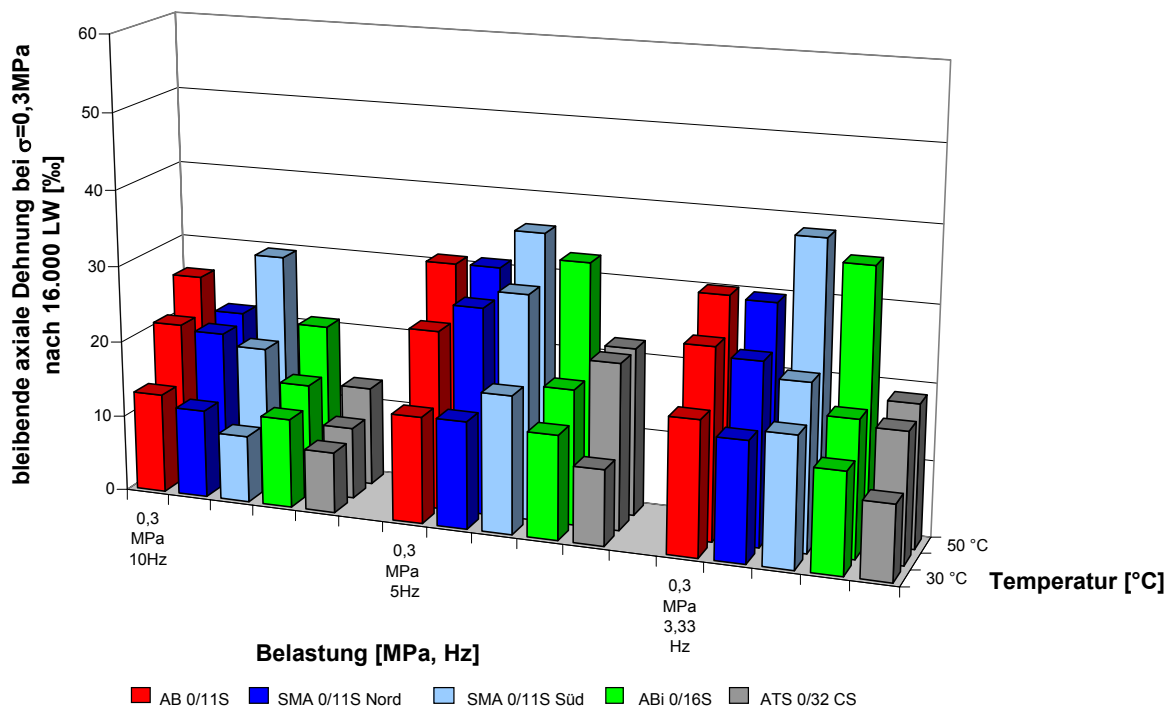


Abb. 4-72: Vergleich der bleibenden axialen Dehnungen nach 16.000 LW verschiedener Asphaltvarianten – DSV ($\sigma_1=0,3$ MPa)

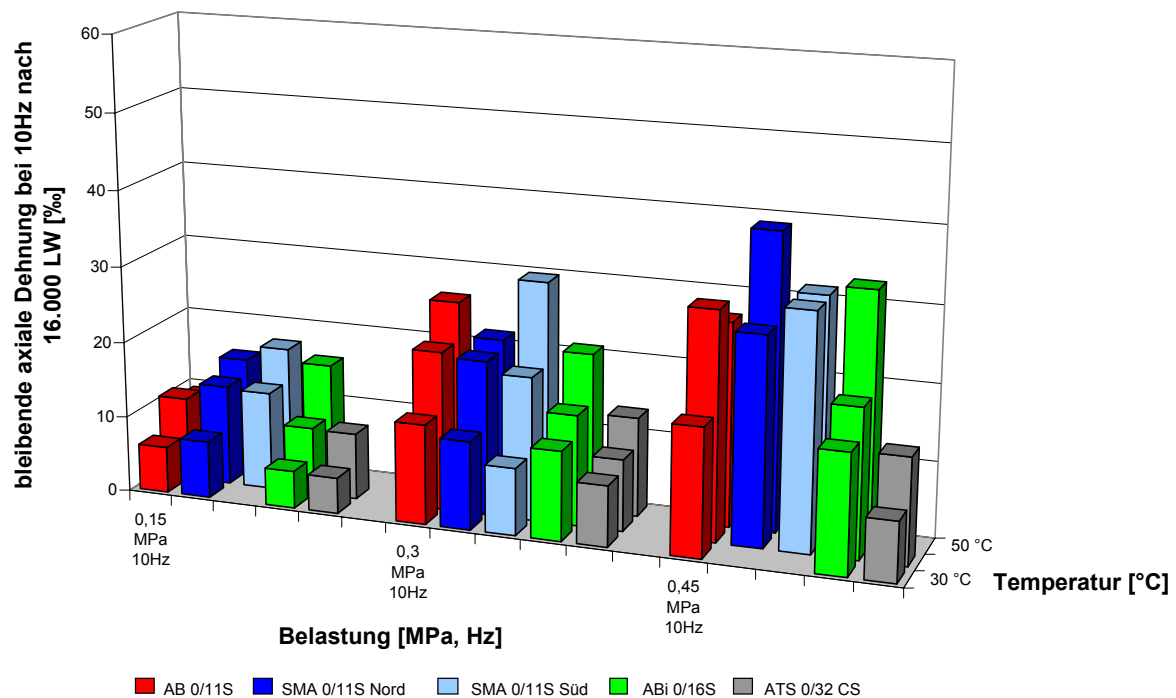


Abb. 4-73: Vergleich der bleibenden axialen Dehnungen nach 16.000 LW verschiedener Asphaltvarianten – DSV (10 Hz)

Die bei dem Asphaltbeton beschriebenen Tendenzen der bleibenden axialen Dehnungen werden von den weiteren untersuchten Asphalten bestätigt. Dabei besitzt die Asphalttragschichtvariante bei allen untersuchten Prüfkombinationen den größten Verformungswiderstand gefolgt von der Asphaltbindervariante. Das Ranking der Asphaltdeckschichtvarianten unterscheidet sich je nach Beanspruchungskombination. Ein Grund für das nicht einheitlich mögliche Ranking der Asphaltdeckschichtvarianten bei allen Prüfkombinationen liegt sicherlich darin, dass bei diesen Versuchen die Dehnungen über dem gesamten Probekörper erfasst werden und nicht im mittleren Bereich des Probekörpers (siehe Kapitel 4.2.4).

Auch die „freie“ radiale Verformung trägt zu einem nicht bei allen Prüfkombinationen einheitlichen Ranking bei, da die Zusammensetzung des Korngerüsts sich bei den Asphaltvarianten deutlich unterscheidet und somit die Probekörper verschieden auf die Belastung reagieren.

Weiter musste mit diesem Prüfverfahren eine größere Streubreite der Versuchsergebnisse im Gegensatz zu den beiden anderen Prüfverfahren festgestellt werden.

4.4.2 Dynamischer Triaxialversuch - bleibende Verformung

Die axiale Spannung betrug bei allen durchgeführten Versuchen 1,0 MPa. Die radialen Spannungen variierten im Bereich von 0,01 bis 0,9 MPa.

In der folgenden Abbildung wurden die bleibenden axialen Dehnungen nach 16.000 Lastwechseln und 100.000 Lastwechseln sowie die Dehnungsraten im Lastwechselbereich vom 10.000. bis 16.000. über die Deviatorspannungen aufgetragen.

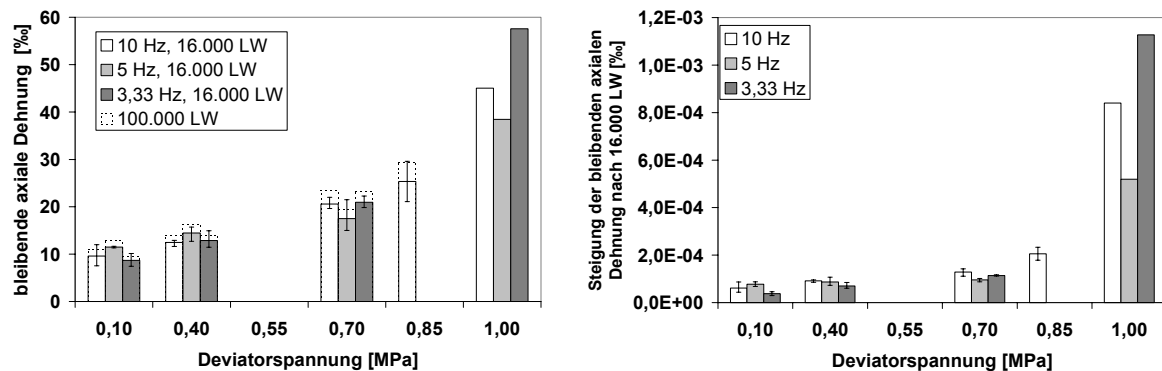


Abb. 4-74: Vergleich der bleibenden axialen Dehnungen nach 16.000 und 100.000 LW sowie der Dehnungsraten - Triax (AB, 30 °C)

Mit steigender Deviatorspannung, d.h. mit abnehmender radialer Spannung, nehmen die bleibenden axialen Dehnungen und Dehnungsraten gemessen bei 30 °C zu. Ein Frequenzeinfluss ist nicht feststellbar. Die Zunahme der bleibenden axialen Dehnungen im Bereich vom 16.000. zu dem 100.000. Lastwechsel ist im Vergleich zu dem Zuwachs vom 1. bis zum 16.000. Lastwechsel sehr gering.

Wird die Prüftemperatur auf 50 °C erhöht, werden für beide Verformungskenngrößen größere Werte gemessen, siehe Abbildung 4-75.

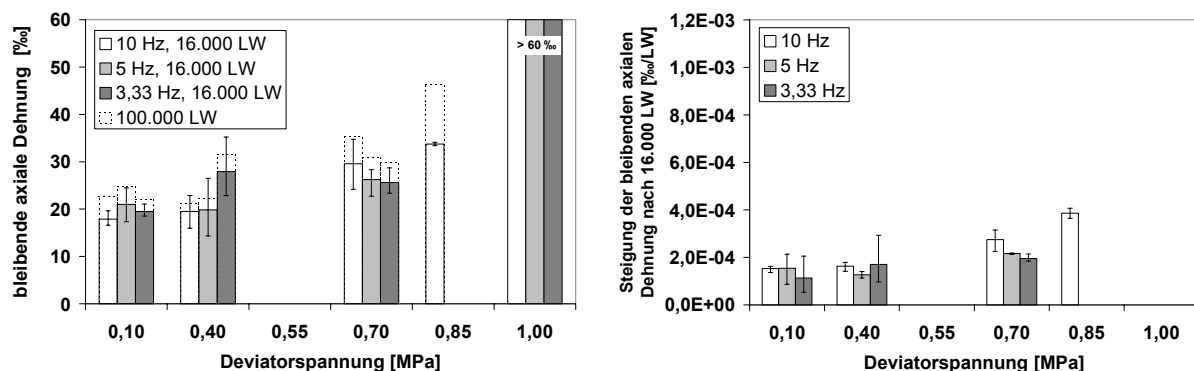


Abb. 4-75: Vergleich der bleibenden axialen Dehnungen nach 16.000 und 100.000 LW sowie der Dehnungsraten – Triax (AB, 50 °C)

Die Einflüsse der variierten Beanspruchungsgrößen Frequenz und Deviatorspannung auf die bleibende axiale Dehnung und Dehnungsrate ermittelt bei 50 °C entsprechen den Einflüssen, die bei 30 °C ermittelt wurden.

Bei dem Triaxialversuch werden die Dehnungen in axialer und in radialer Richtung erfasst. Wie in Abbildung 4-76 dargestellt, sind die bleibenden radialen Dehnungen nach 100.000 Lastwechsel im Vergleich zu den axialen erwartungsgemäß kleiner. Die Zunahme der bleibenden axialen und radialen Dehnungen mit steigender Deviatorspannung und Prüftemperatur sind deutlich erkennbar. Der Einfluss der Frequenz auf die bleibende Dehnung - dass mit kleinerer Frequenz höhere Dehnungen erzeugt werden - konnte mit diesen Ergebnissen nicht eindeutig nachgewiesen werden.

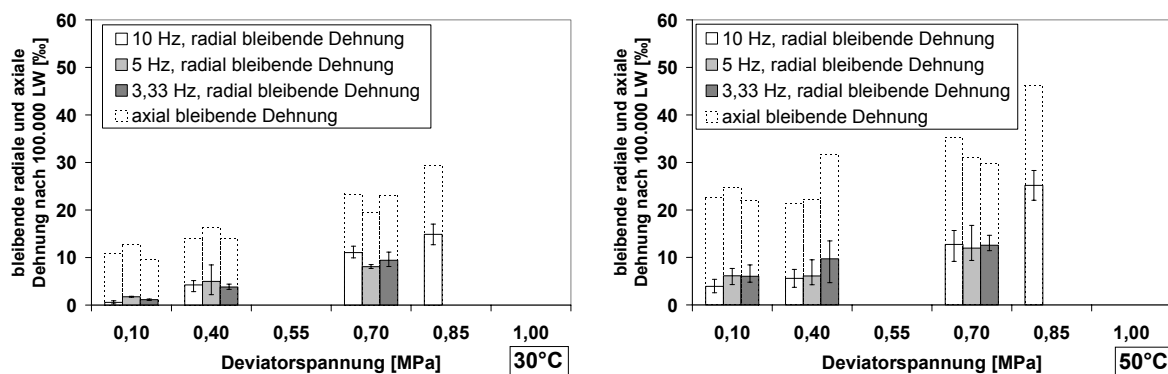


Abb. 4-76: Vergleich der bleibenden radialen und axialen Dehnungen nach 100.000 LW – Triax (AB, 30 °C und 50 °C)

Bei der Asphaltvariante AB wurden auch bei vergleichsweise hohen radialen Spannungen im Probekörper ($\sigma_{Dev}=0,1$ MPa) keine radialen Stauchungen gemessen. Ein anderes Dehnungsverhalten zeigte sich bei der Asphaltvariante ABi, siehe Abbildung 4-77.

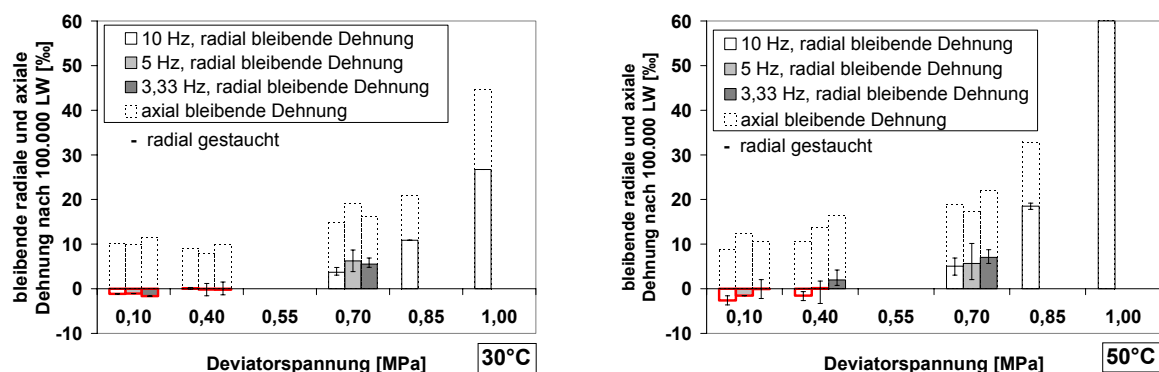


Abb. 4-77: Vergleich der bleibenden radialen und axialen Dehnungen nach 100.000 LW – Triax (ABi, 30 °C und 50 °C)

Bei einer Deviatorspannung von 0,1 MPa (axiale Spannung 1,0 MPa, radiale Spannung 0,9 MPa) und von 0,4 MPa (axiale Spannung 1,0 MPa, radiale Spannung 0,6 MPa) werden die Probekörper radial und auch axial gestaucht. Es kommt zu einer Komprimierung des Probekörpervolumens. Bei Deviatorspannungen größer 0,4 MPa erreichen die bleibenden radialen Dehnungen wieder positive Dehnungswerte. Dass es bereits vor dem Erreichen des hydrostatischen Spannungszustandes zu radialen Stauchungen kommt, kann mit dem geringen h/d -Verhältnis von 0,8, dem Einfluss der Reibung zwischen Laststempel und Probekörperendfläche sowie den unterschiedlichen Querdehnzahlen μ der untersuchten Asphaltvarianten (siehe Kapitel 4.3.3.1) erklärt werden. Die ermittelten bleibenden axialen Dehnungen bei einer Deviatorspannung von 0,1 MPa und 0,4 MPa sind somit gesondert zu betrachten.

Werden nur die axialen bleibenden Dehnungen und Dehnungsraten betrachtet, so zeigen sich für den Asphaltbinder die gleichen Tendenzen wie bei der Asphaltbetonvariante, siehe Abbildungen 4-78 und 4-79.

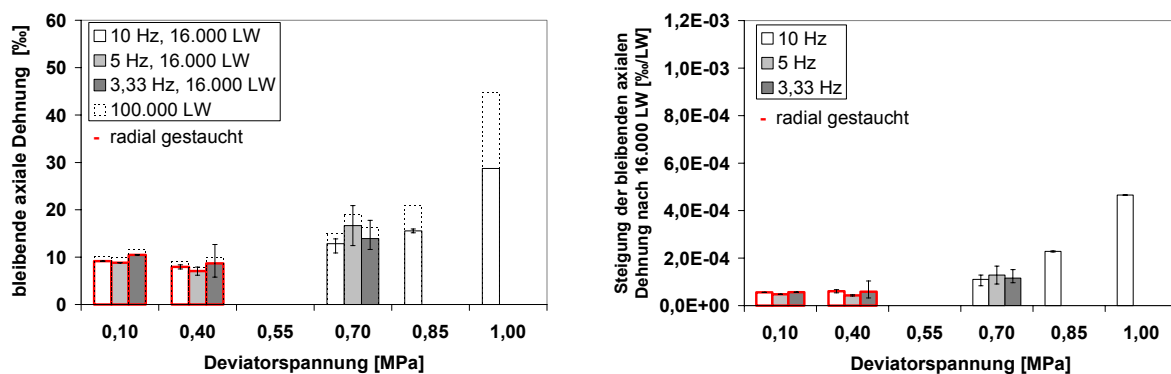


Abb. 4-78: Vergleich der bleibenden axialen Dehnungen nach 16.000 und 100.000 LW sowie der Dehnungsraten - Triax (ABi, 30 °C)

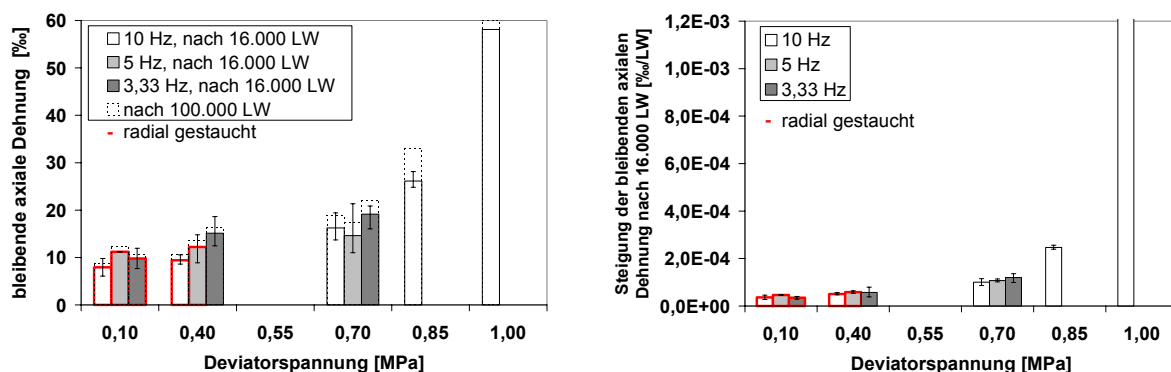


Abb. 4-79: Vergleich der bleibenden axialen Dehnungen nach 16.000 und 100.000 LW sowie der Dehnungsraten - Triax (ABi, 50 °C)

Ein Vergleich der bleibenden axialen Dehnung der im Prüfumfang enthaltenen Asphalte nach 100.000 Lastwechsel, ermittelt bei 10 Hz, verschiedenen Deviatorspannungen und unterschiedlichen Prüftemperaturen zeigt, dass die Asphaltbinder- und die Asphalttragschichtvariante insgesamt die geringsten Dehnungen aufweisen, siehe Abbildung 4-80.

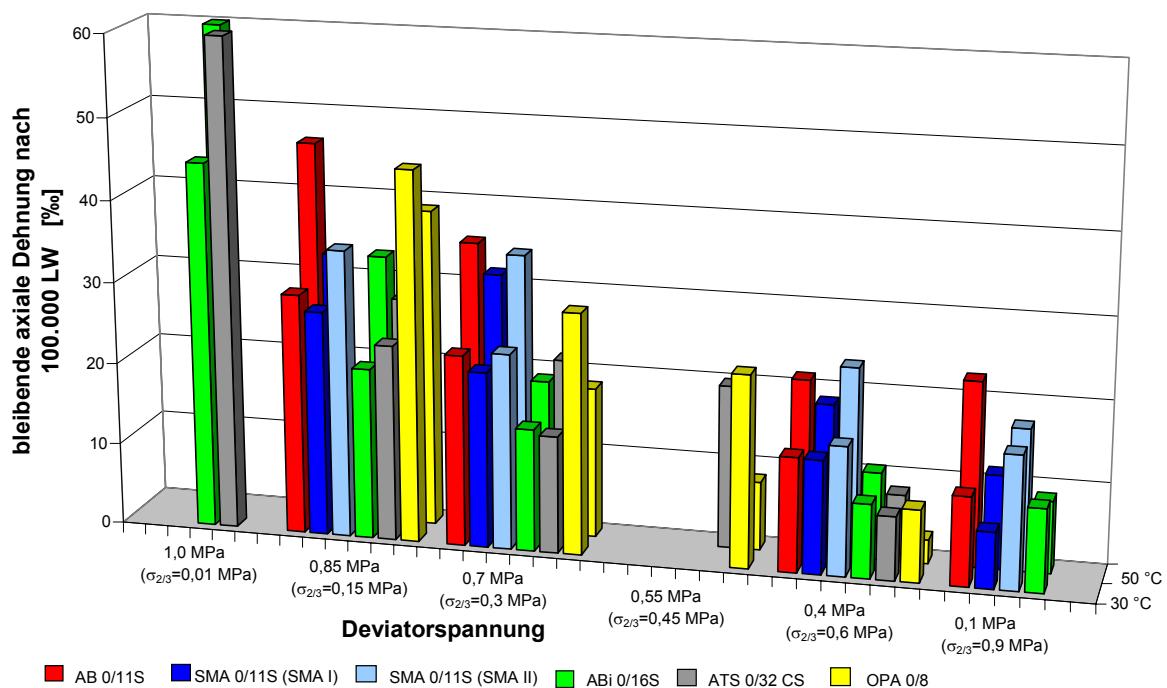


Abb. 4-80: Vergleich der bleibenden axialen Dehnungen der verschiedenen Asphaltvarianten nach 100.000 LW - Triax (10 Hz)

Bei einer Deviatorspannung von 0,7 MPa unterscheiden sich die Asphaltdeckschichtvarianten SMA I, SMA II und AB wenig voneinander. Je kleiner die Deviatorspannungen werden, desto kleiner werden die bleibenden axialen Dehnungen und umso stärker unterscheiden sich die Asphaltdeckschichtvarianten im Dehnungsverhalten voneinander. Das Ranking der verschiedenen Asphalte streut bei den Ergebnissen der einzelnen Beanspruchungskombinationen stark. Die Asphaltdeckschichtvarianten AB, SMA I und SMA II bilden bei 30 °C und einer Deviatorspannung von 0,85 MPa, 0,7 MPa und 0,4 MPa eine Gruppe sowie bei 50°C und 0,4 bzw. 0,7 MPa. Eine Zweite bilden die Asphaltbinder- und Asphalttragschichtvariante, deren bleibende axiale Dehnungen geringer ausfallen.

Ein Temperatureinfluss auf die bleibende axiale Dehnung – in Form von kleinerer Dehnung bei geringerer Temperatur – ist bei allen untersuchten Asphalten außer bei der offenenporigen Asphaltvariante zu erkennen.

Bei gleichzeitiger Betrachtung die bleibenden radialen und axialen Dehnungen nach 100.000 LW, lässt sich der gegenläufige Temperatureinfluss bei der offenporigen Asphaltvariante erklären, siehe Abbildung 4-81.

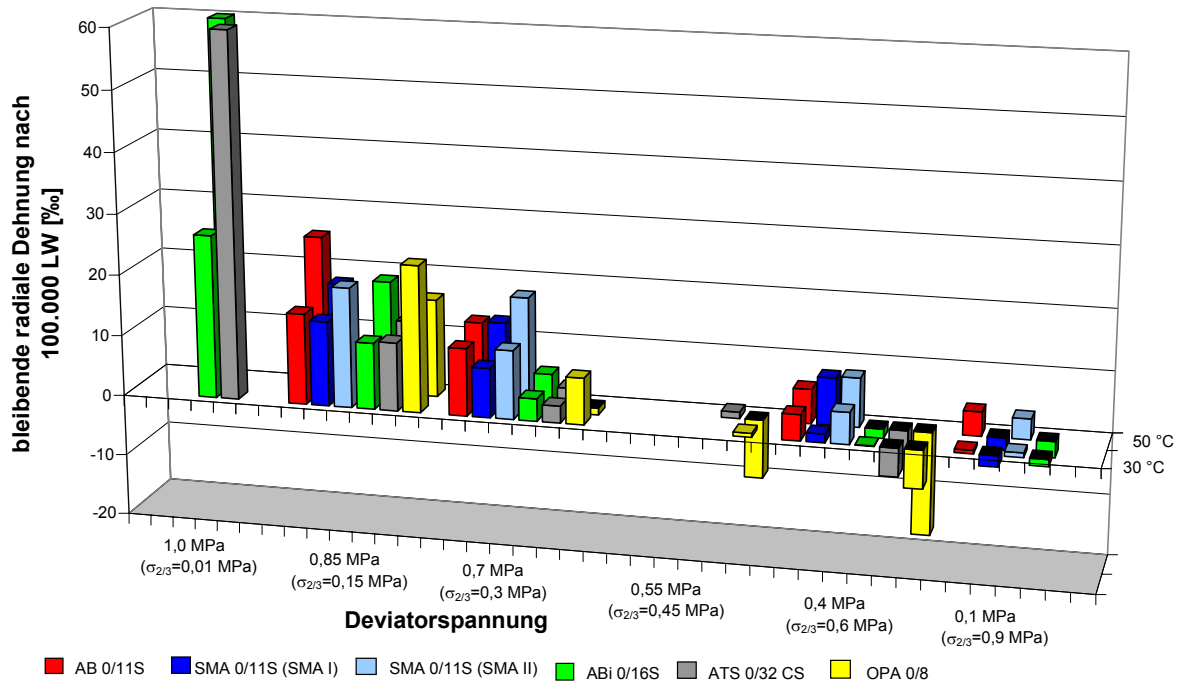


Abb. 4-81: Vergleich der bleibenden radialen Dehnungen der verschiedenen Asphaltvarianten nach 100.000 LW - Triax (10 Hz)

Bei 50 °C und einer Deviatorspannung von 0,4 MPa, 0,55 MPa und 0,7 MPa werden die Probekörper des offenporigen Asphaltes gestaucht und dadurch die bleibenden axialen Dehnungen minimiert.

Eine Erklärung dafür, warum der offenporige Asphalt gestaucht wird – gleiche Beobachtungen wurden in abgeschwächter Form bei der Asphalttragschicht- und der Asphaltbindervariante gemacht –, ist der höhere Hohlraumgehalt im Vergleich zu dem Asphaltbeton und dem Splittmastixasphalt.

Durch die radiale Belastung und den höheren Hohlraumgehalt erfahren die Probekörper eine Verdichtung in radialer Richtung, die orthogonal zur Hauptverdichtungsrichtung wirkt. Infolge dieser radialen Verdichtung werden die bleibenden axialen Verformungen reduziert.

Um diese These zu bekräftigen, ist eine Volumenbetrachtung je Lastwechsel notwendig, die im Rahmen dieser Arbeit nicht erfolgte.

4.4.3 Dynamischer Stempleindringversuch – bleibende Verformung

Die bleibenden axialen Dehnungen und Dehnungsraten ermittelt mit dem dritten Prüfverfahren, dem dynamischen Stempleindringversuch, sind beispielhaft für die Asphaltvariante AB in den Abbildungen 4-82 bis 4-84 dargestellt.

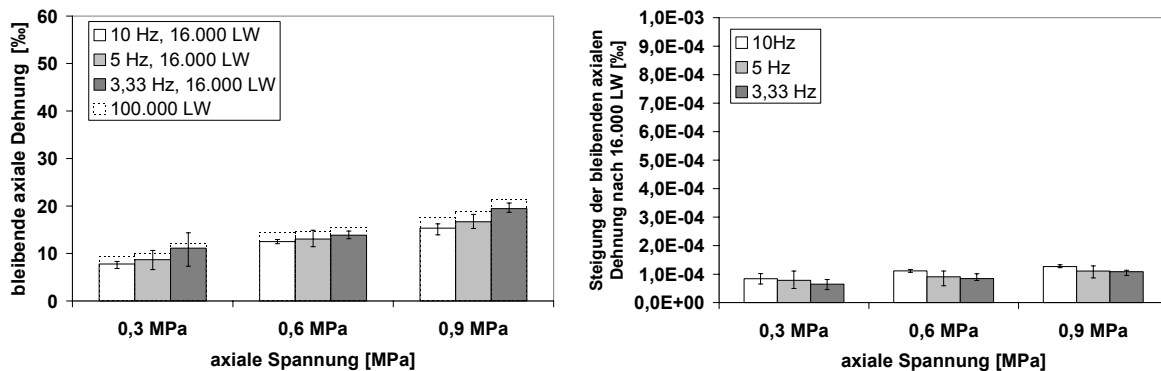


Abb. 4-82: Vergleich der bleibenden axialen Dehnungen nach 16.000 LW bzw. 100.000 LW sowie der Dehnungsraten – DSEV (AB, 30 °C)

Der Lasteinfluss ist bei der Auswertung der bleibenden axialen Dehnung ermittelt bei einer Prüftemperatur von 30 °C zu erkennen. Mit steigender axialer Spannung nehmen sowohl die Dehnungen als auch die Dehnungsraten zu. Die Zunahme der bleibenden axialen Dehnungen verursacht durch die letzten 84.000 Lastwechsel ist im Gegensatz zu dem Zuwachs innerhalb der ersten 16.000 Lastwechsel sehr gering. Ein Frequenzeinfluss ist bei der Betrachtung der Mittelwerte zu erkennen. Die Dehnungsraten unterscheiden sich hinsichtlich des Frequenz- und Lasteinflusses bei 30 °C kaum. Bei einer Prüftemperatur von 40 °C verringert sich die Streubreite der Dehnungsraten und es ist ein eindeutiger Einfluss der Beanspruchung auf die Dehnungsrate feststellbar. Die bleibenden axialen Dehnungen steigen mit Zunahme der axialen Spannung an.

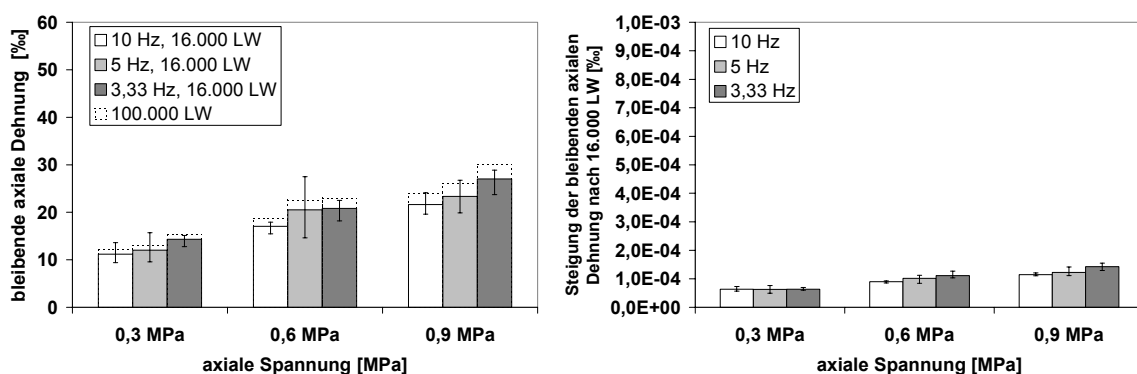


Abb. 4-83: Vergleich der bleibenden axialen Dehnungen nach 16.000 LW bzw. 100.000 LW sowie der Dehnungsraten – DSEV (AB, 40 °C)

Eine weitere Steigerung der Prüftemperatur auf 50 °C bewirkt nur geringfügig höhere bleibende axiale Dehnungen. Der Mittelwertvergleich der Dehnungen lässt keinen plausiblen Frequenzeinfluss jedoch einen Lasteinfluss erkennen. Die Dehnungsraten steigen bei 50 °C mit zunehmendem Axialdruck deutlich an. Sowohl ein Last- als auch ein Frequenzeinfluss sind bei dieser Kenngröße feststellbar.

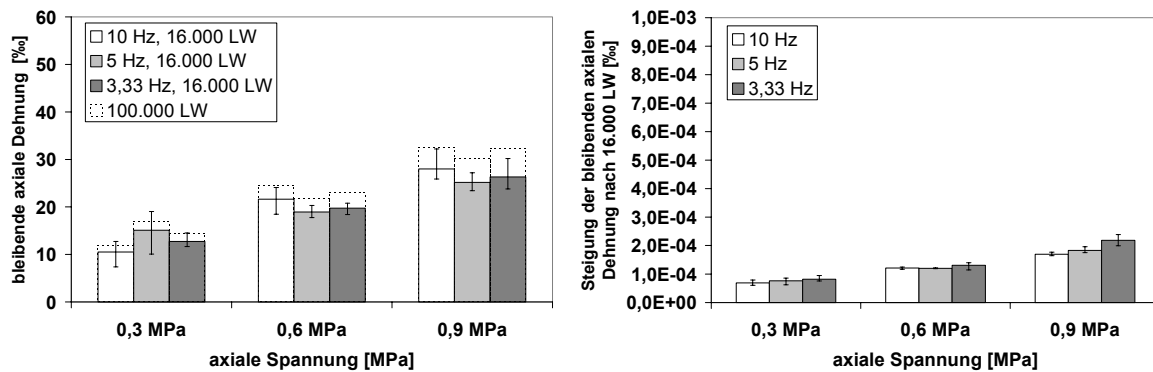


Abb. 4-84: Vergleich der bleibenden axialen Dehnungen nach 16.000 LW bzw. 100.000 LW sowie der Dehnungsraten – DSEV (AB, 50 °C)

Das Ranking der untersuchten Asphalte verändert sich bei diesem Prüfverfahren und den unterschiedlichen Beanspruchungskombinationen im Gegensatz zu dem einaxialen Druckschwellversuch und dem dynamischen Triaxialversuch wenig, siehe Abbildung 4-85.

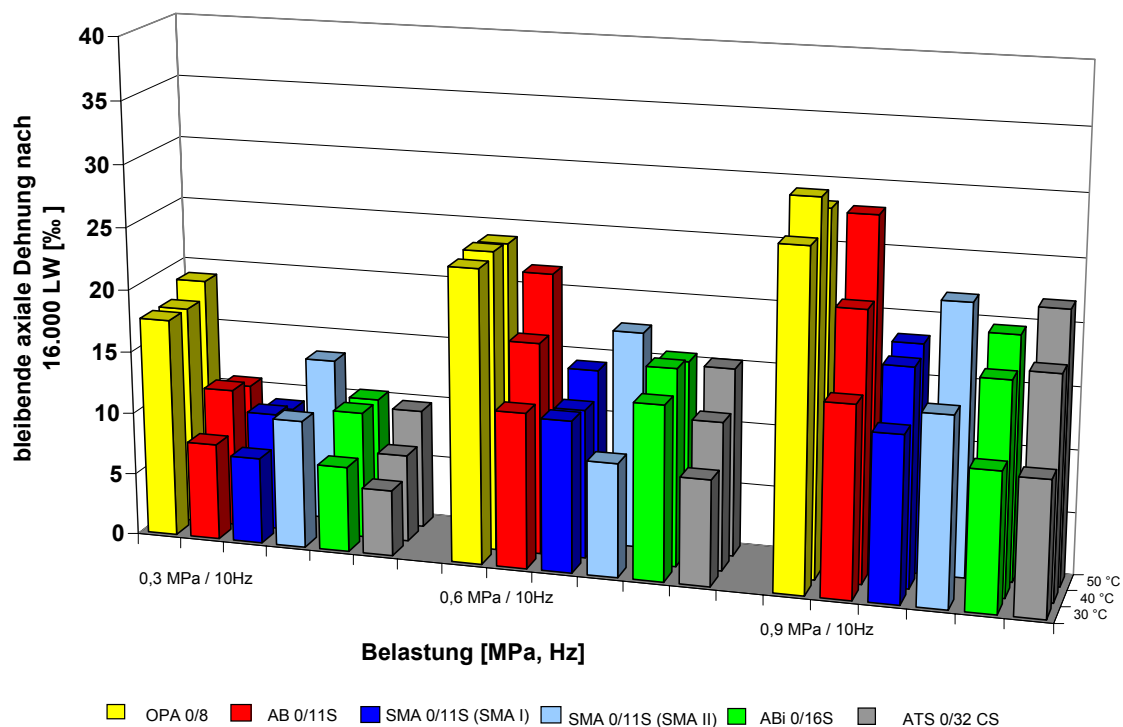


Abb. 4-85: Vergleich der bleibenden axialen Dehnungen verschiedener Asphaltvarianten nach 16.000 LW – DSEV (10 Hz)

Die größten bleibenden axialen Dehnungen werden bei der offenporigen Asphaltvariante erreicht. Dieses Ergebnis überrascht aus dem Grund, da aus der Praxis bekannt ist, dass offenporiger Asphalt in der Regel verformungsbeständiger ist als Asphaltbeton und Splittmastixasphalt. Eine vermutete Ursache hierfür könnte die Beanspruchung ohne Lastpause sein, da durch die fehlenden Belastungspausen das Material nicht relaxieren kann und der Bindemittelfilm zwischen den Gesteinskörnern mehr und mehr in die bei dieser Asphaltvariante zahlreich vorhandenen Hohlräume gedrängt wird. Die kleinsten bleibenden axialen Dehnungen nach 16.000 Lastwechsel werden bei den Asphaltvarianten SMA I, ABi und ATS erreicht. Der AB und der SMA II zeigen etwas größere Dehnungen und bilden beim Ranking das Mittelfeld.

Im Gegensatz zum deutlichen Last- und Temperatureinfluss auf die bleibende axiale Dehnung zeigen die untersuchten Asphaltvarianten nur einen sehr geringen bis keinen Frequenzeinfluss, siehe Abbildung 4-86.

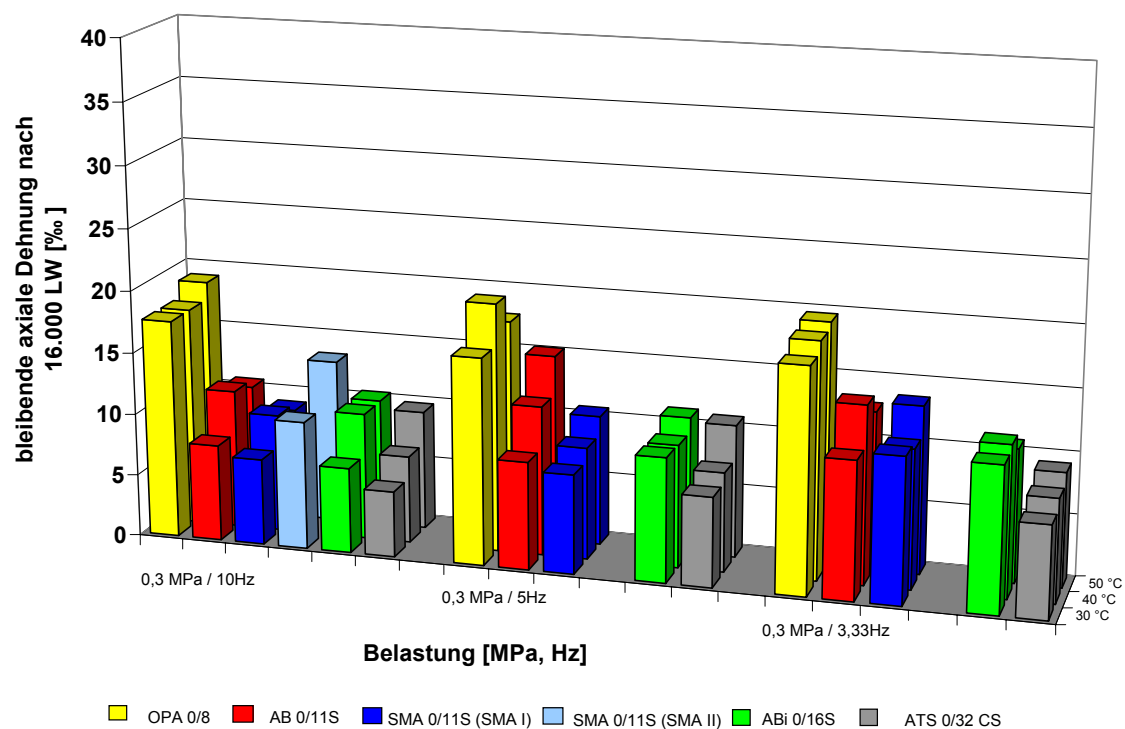


Abb. 4-86: Vergleich der bleibenden axialen Dehnungen verschiedener Asphaltvarianten – DSEV ($\sigma_1=0,3$ MPa)

Die oben beschriebenen Einflüsse von Last, Temperatur und Frequenz auf das Materialverhalten treten auch in gleicher Form bei den untersuchten Oberspannungen von 0,6 und 0,9 MPa auf, deren Ergebnisse hier nicht dargestellt sind, aber dem Anhang D zu entnehmen sind.

4.4.4 Spurbildungsversuch – bleibende Verformung

Die mit dem Spurbildungsversuch ermittelten Weg-Zeit-Kurven der untersuchten Asphalte lassen sich in drei Gruppen einteilen. Die erste Gruppe wird von den beiden Splittmastixvarianten SMA I und SMA II sowie der Asphaltbindervariante gebildet, die einen sehr hohen Verformungswiderstand aufweisen, siehe Abbildung 4-87.

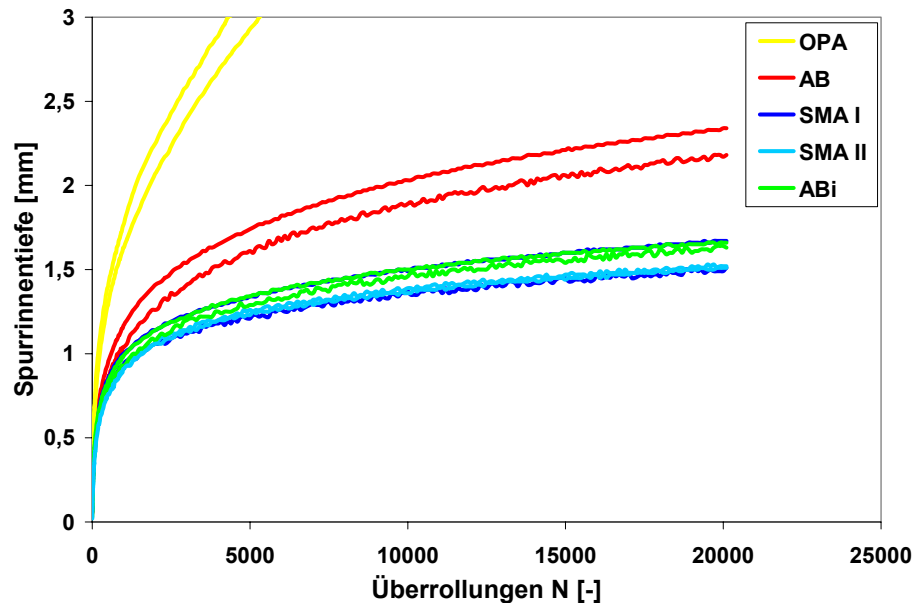


Abb. 4-87: Ergebnisse der Spurbildungsversuche

Die zweite Gruppe stellt der Asphaltbeton dar, bei der im Gegensatz zu der ersten Gruppe eine tiefere Spurrinne ermittelt wurde. Die größten Verformungen werden bei der offenporigen Asphaltvariante, der dritten Gruppe, gemessen. Diese verhältnismäßig großen Verformungen deuten neben den Ergebnissen des dynamischen Stempелеindringversuchs auf eine unzureichende Verdichtung oder ein zu „weich“ konzipiertes Mischgut hin, da der offenporige Asphalt sich in der Praxis gerade in Bezug auf Spurrinnenbildung als sehr verformungsresistent bewehrt hat. Diese möglichen Ursachen zur Begründung des festgestellten Verhaltens konnten allerdings nicht zahlenmäßig untermauert werden, da keine Abweichungen in den Kontrollprüfungen des in einer Asphaltmischanlage hergestellten offenporigen Asphalts ermittelt wurden und die Probekörper einen angemessenen Hohlraumgehalt aufwiesen, siehe Anhang D, F.

Somit kann die These aufgestellt werden, dass die realen Bedingungen für diesen Asphalt nicht mit dem Spurbildungsversuch simuliert werden können und dadurch die ermittelten Kurven nicht vergleichbar mit denen der anderen Mischgutvarianten sind.

4.4.5 Approximation der Dehnungsverläufe

Um nicht nur punktuell d.h. nach einer bestimmten Lastwechselzahl die ermittelten Dehnungen auszuwerten, wie es in den Kapiteln 4.4.1 bis 4.4.3 durchgeführt wurde, werden in diesem Kapitel die Verläufe der bleibenden axialen Dehnungen untersucht. Dazu werden zunächst die Dehnungsverläufe mit den folgenden drei verschiedenen Gleichungen und der Methode der kleinsten Fehlerquadrate approximiert.

$$\varepsilon(n) = a \cdot n^k + b \cdot (e^{c \cdot n} - 1) \quad \text{Gleichung 4-17}$$

$$\varepsilon(n) = \varepsilon_0 + a \cdot n^k + b \cdot (e^{c \cdot n} - 1) \quad \text{Gleichung 4-18}$$

mit

$\varepsilon(n)$ = bleibende Dehnung nach n Lastwechseln [‰]

ε_0 = Anpassungskoeffizient [-]

a, b = Anpassungskoeffizienten [-]

k, c = Anpassungsexponenten [-]

n = Anzahl der Lastwechsel [-]

$$\varepsilon(n) = \left(\frac{1}{h} \cdot 1000 \right) \cdot \frac{1}{2} \cdot \ln \frac{A_1 + A_2 \cdot \ln(n \cdot t_{Be})}{1 - A_3 \cdot \ln(n \cdot t_{Be})} \quad \text{Gleichung 4-19}$$

mit

$\varepsilon(n)$ = bleibende Dehnung nach n Lastwechseln [‰]

h = Höhe des Probekörpers [mm]

A_1, A_2, A_3 = Anpassungskoeffizienten

n = Anzahl der Lastwechsel

t_{Be} = Belastungszeit [s]

Ziel dieser Untersuchung ist es, festzustellen, welche dieser drei ausgewählten Gleichungen die Dehnungsverläufe der einaxialen Druckschwellversuche, der dynamischen Triaxialversuche und der dynamischen Stempeleindringversuche am besten beschreibt. Darüber hinaus werden die jeweiligen Faktoren und Exponenten dieser Gleichungen hinsichtlich der Abhängigkeit von den Prüfbedingungen Frequenz, Temperatur und Last untersucht. Mit den ermittelten Abhängigkeiten können für beliebige Prüfbedingungen, die innerhalb des hier geprüften Bereiches liegen, die Faktoren und Exponenten bestimmt werden, um Dehnungsverläufe zu prognostizieren.

4.4.5.1 Approximation der Dehnungsverläufe ermittelt mit dem einaxialen Druckschwellversuch

Die mit dem einaxialen Druckschwellversuch ermittelten bleibenden axialen Dehnungen nehmen innerhalb der ersten 100 Lastwechsel deutlich stärker zu als im mittleren Bereich der Dehnungskurve (der zweiten Phase). Um die Auswirkungen der anfänglichen Dehnungszunahme auf das erreichte Bestimmtheitsmaß der Approximation zu untersuchen, wurden die Dehnungsverläufe mit den oben genannten Gleichungen sowohl ab dem 1. als auch ab dem 100. Lastwechsel bis zum Versuchsende approximiert. Vergleichend werden in den folgenden Abbildungen die Steigungen der im Versuch ermittelten (original) und der approximierten Dehnungsverläufe für den Asphaltbeton gegenübergestellt. Die dargestellten Steigungen der Dehnungsverläufe sind die, der letzten 8.000 Lastwechsel.

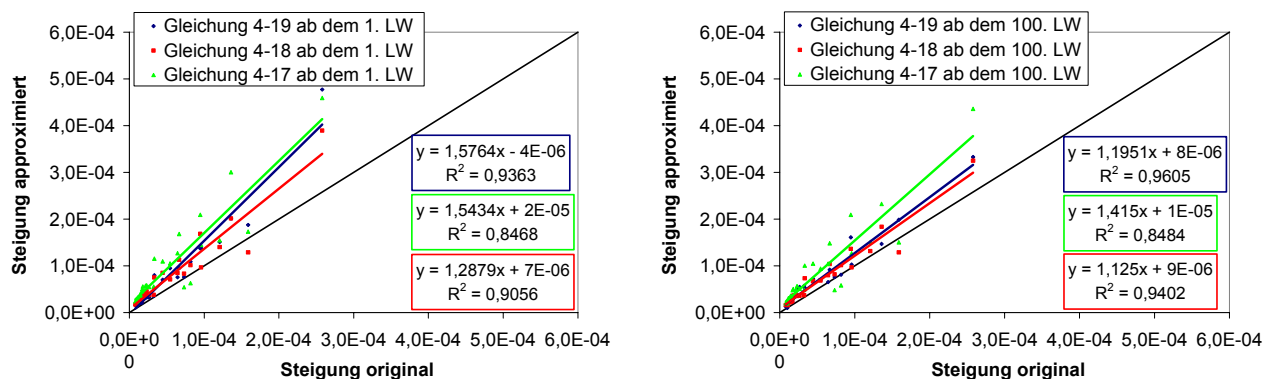


Abb. 4-88: Steigung der letzten 8.000 Lastwechsel der Dehnungsverläufe (approximiert, original) - DSV (AB)

Die Steigungen der approximierten Dehnungsverläufe sind bis auf wenige Ausnahmen größer als die der im Versuch ermittelten (originalen) Dehnungsverläufe.

Die Abbildungen zeigen deutlich für die approximierten Steigungen ab dem 100. Lastwechsel eine bessere Übereinstimmung mit den Messwerten als die approximierten Steigungen ab dem 1. Lastwechsel. Dies kann über den Abstand zur Winkelhalbierenden, die eine eindeutige Übereinstimmung der Steigungen darstellt, beurteilt werden. Die Gleichung 4-18 ermöglicht die größte Annäherung an die im Versuch ermittelten Steigungen der Dehnungsverläufe, die Gleichung 4-17 die geringste.

Diese Tendenz findet sich auch bei der Häufigkeitsverteilung der Bestimmtheitsmaße der verwendeten Approximationsgleichungen wieder, siehe Abbildung 4-89.

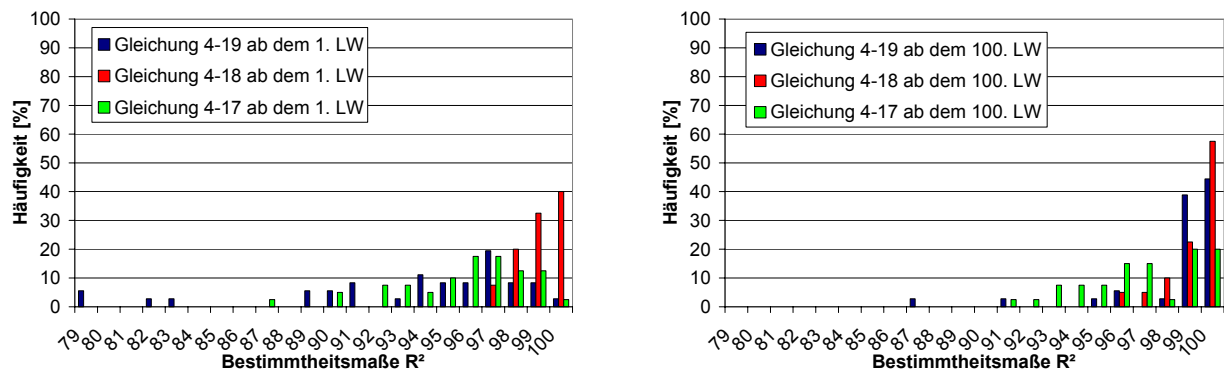


Abb. 4-89: Häufigkeitsverteilung der Bestimmtheitsmaße der verwendeten Approximationsgleichungen – DSV (AB)

Sowohl ab dem 1. Lastwechsel als auch ab dem 100. Lastwechsel zeigt die Gleichung 4-18 die höchsten Bestimmtheitsmaße gegenüber den Approximationsgleichungen 4-17 und 4-19.

Aufgrund dieser Ergebnisse und um die Abweichungen zu den gemessenen bzw. aus dem Versuch abgeleiteten Werten so gering wie möglich zu halten, wurden die Dehnungsverläufe der weiteren im Versuchsumfang enthaltenen Asphalte ab dem 100. LW mit der Gleichung 4-18 approximiert.

Eine weitere Steigerung der Bestimmtheitsmaße sowie eine weitere Minimierung der Differenz zwischen der approximierten und der originalen Steigung der letzten 8.000 Lastwechsel einer Dehnungskurve kann dadurch erreicht werden, wenn mehr als die ersten 100 Lastwechsel bei der Approximation des Dehnungsverlaufes unberücksichtigt bleiben. Dies wurde aufgrund des damit verbundenen Informationsverlustes der Dehnung im Anfangsbereich nicht weiter verfolgt.

4.4.5.2 Approximation der Dehnungsverläufe ermittelt mit dem dynamischen Triaxialversuch

Die Kurven der bleibenden axialen Dehnungen, ermittelt mit dem dynamischen Triaxialversuch, verlaufen bedingt durch den seitlichen Stützdruck nicht so progressiv steigend wie die der einaxialen Druckschwellversuche. Wendepunkte in den Dehnungskurven wurden auch bei geringem Stützdruck nicht festgestellt.

Wie bei den Ergebnissen der einaxialen Druckschwellversuche, nähern sich die Verhältnisswerte von approximierter zur im Versuch ermittelter (originaler) Steigung bei der Approximation des Dehnungsverlaufes ab dem 100. Lastwechsel mehr der

Winkelhalbierenden an, als die bei einer Approximation ab dem 1. Lastwechsel, siehe Abbildung 4-90.

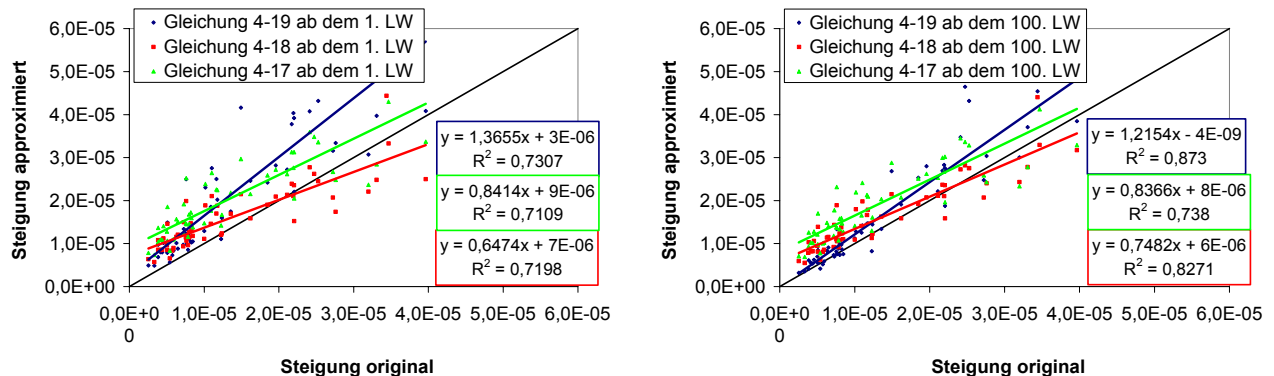


Abb. 4-90: Steigung der letzten 8.000 Lastwechsel der Dehnungsverläufe (approximiert, original) – Triax (AB)

Für die Approximation ab dem 100. Lastwechsel, ermittelt bei einer Prüftemperatur von 30 °C, ist die Gleichung 4-19 am besten geeignet. Dies wird von den Verhältniswerten „Steigung approximiert“ zu „Steigung original“ bestätigt. Der Abstand dieser Werte von der Winkelhalbierenden im unteren Steigungsbereich – der die Steigung bei 30 °C darstellt – ist im Vergleich zu den der Gleichungen 4-18 und 4-17 am geringsten. Für die Approximation der Dehnungskurven ermittelt bei 50 °C, ist die Gleichung 4-18 hinsichtlich der Steigung am Versuchsende zu favorisieren. Die Trendlinie der Verhältniswerte „Steigung approximiert“ zu „Steigung original“ nähert sich am deutlichsten im oberen Steigungsbereich der Winkelhalbierenden an. Werden die Häufigkeiten der erreichten Bestimmtheitsmaße der jeweiligen Gleichungen ausgewertet, ergibt sich folgende Verteilung, siehe Abbildung 4-91.

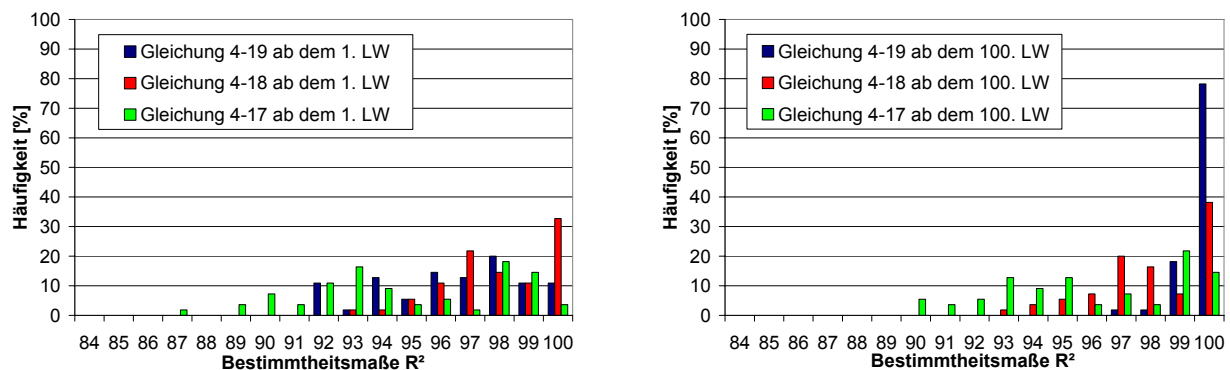


Abb. 4-91: Häufigkeitsverteilung der Bestimmtheitsmaße der verwendeten Approximationsgleichungen – Triax (AB)

Mit der Gleichung 4-17 werden Bestimmtheitsmaße bei einer Approximation ab dem 100. Lastwechsel von 90 bis 100 % erreicht. Dieser Bereich wird bei Verwendung der Gleichung 4-18 auf 93 bis 100 % minimiert. Die geringste Spannweite der Bestimmtheitsmaße decken die Approximationen mit der Gleichung 4-19 mit 97 bis 100 % ab. 78 % der durchgeführten Versuche werden mit dieser Gleichung mit einem Bestimmtheitsmaß von 100 % beschrieben.

Unter Berücksichtigung der Auswertung der erreichten Endsteigungen der Dehnungskurven wurden die Dehnungsverläufe der weiteren im Versuchsumfang enthaltenen Mischgutvarianten ab dem 100. LW sowohl mit der Gleichung 4-19 als auch mit der Gleichung 4-18 approximiert.

4.4.5.3 Approximation der Dehnungsverläufe ermittelt mit dem dynamischen Stempeleindringversuch

Da der Laststempel nicht die gesamten Probekörperoberfläche bedeckt, wird der belastete Bereich durch den umgebenden, nicht belasteten Teil des Probekörpers gestützt. Durch diese Stützung wurden bei keinem im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche Wendepunkte in den bleibenden axialen Dehnungskurven ermittelt. Auch bei diesem Prüfverfahren weichen bei einer Approximation ab dem 100. Lastwechsel die Verhältnisswerte „Steigung approximiert“ zu „Steigung original“ der drei untersuchten Gleichungen geringer von der Winkelhalbierenden ab, als die bei einer Approximation ab dem 1. Lastwechsel, siehe Abbildung 4-92.

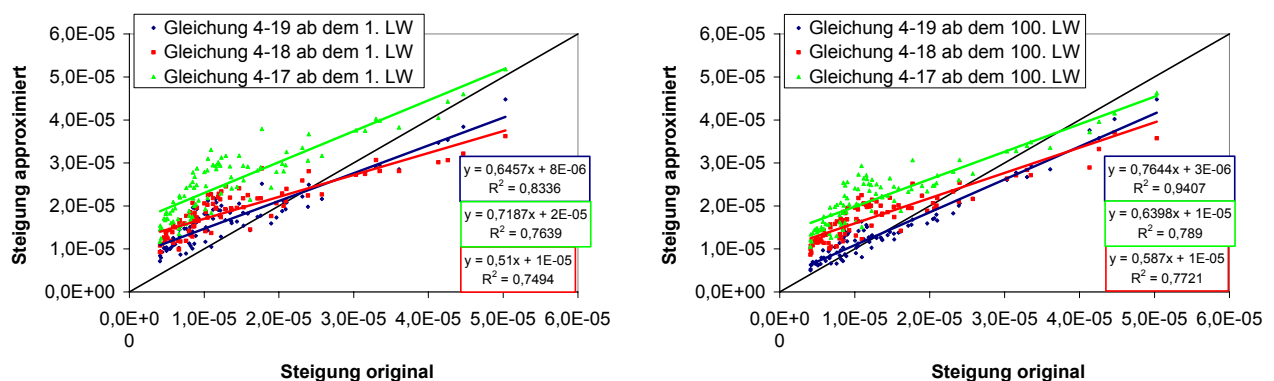


Abb. 4-92: Steigung der letzten 8.000 Lastwechsel der Dehnungsverläufe (approximiert, original) - DSEV (AB)

Die Steigungen der letzten 8.000 Lastwechsel der bleibenden axialen Dehnungskurven werden bei allen durchgeführten Versuchen am besten mit der Approximations-

gleichung 4-19 bestimmt. Die Abweichungen von der Winkelhalbierenden sind bei der Anwendung dieser Gleichung gegenüber den anderen am geringsten. Dies spiegelt sich auch in der Häufigkeitsverteilung der Bestimmtheitsmaße wieder, siehe Abbildung 4-93.

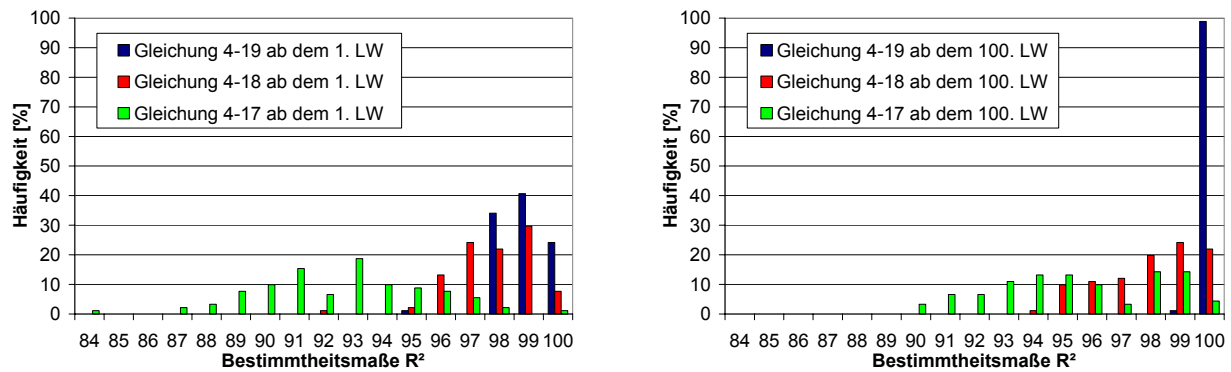


Abb. 4-93: Häufigkeitsverteilung der Bestimmtheitsmaße der verwendeten Approximationsgleichungen – DSEV (AB)

99 % aller durchgeführten Versuche werden bei einer Approximation des bleibenden axialen Dehnungsverlaufes ab dem 100. Lastwechsel mit der Gleichung 4-19 mit einem Bestimmtheitsmaß von 100 % wiedergegeben. Nach dieser Erkenntnis wurden die Dehnungsverläufe der weiteren im Versuchsumfang enthaltenen Asphalte ab dem 100. LW mit der Gleichung 4-19 approximiert.

4.4.5.4 Abhängigkeiten der ermittelten Faktoren und Exponenten der Approximationsgleichungen von den Beanspruchungsgrößen

In dem folgenden Kapitel wird die Abhängigkeit der jeweiligen Faktoren und Exponenten der Approximationsgleichungen von den Beanspruchungsgrößen Frequenz, Temperatur und Last untersucht. Diese Zusammenhänge ermöglichen Prognosen der axialen Dehnungen innerhalb des geprüften und dadurch abgesicherten Bereiches, die für die Material- und Strukturmodellierung entscheidend sind.

Im Folgenden werden die Parameter der Approximationsgleichung 4-17 untersucht. Trotz des vergleichsweise geringen Bestimmtheitsmaßes (vgl. Kapitel 4.4.5.1 bis 4.4.5.3) wird diese Gleichung betrachtet, da die ersten beiden Phasen der Dehnungskurven, mit nur zwei Variablen (a und k) beschrieben werden können und dadurch das Finden von Abhängigkeiten gegenüber den anderen Gleichungen mit mehr Variablen vereinfacht wird. Die ermittelten Faktoren und Exponenten der Approximationsgleichung 4-17 sind für die Dehnungsverläufe der einaxialen Druck-schwellversuche ermittelt am Asphaltbeton in Abhängigkeit von den jeweiligen Prüfbedingungen in den Abbildungen 4-94 und 4-95 dargestellt.

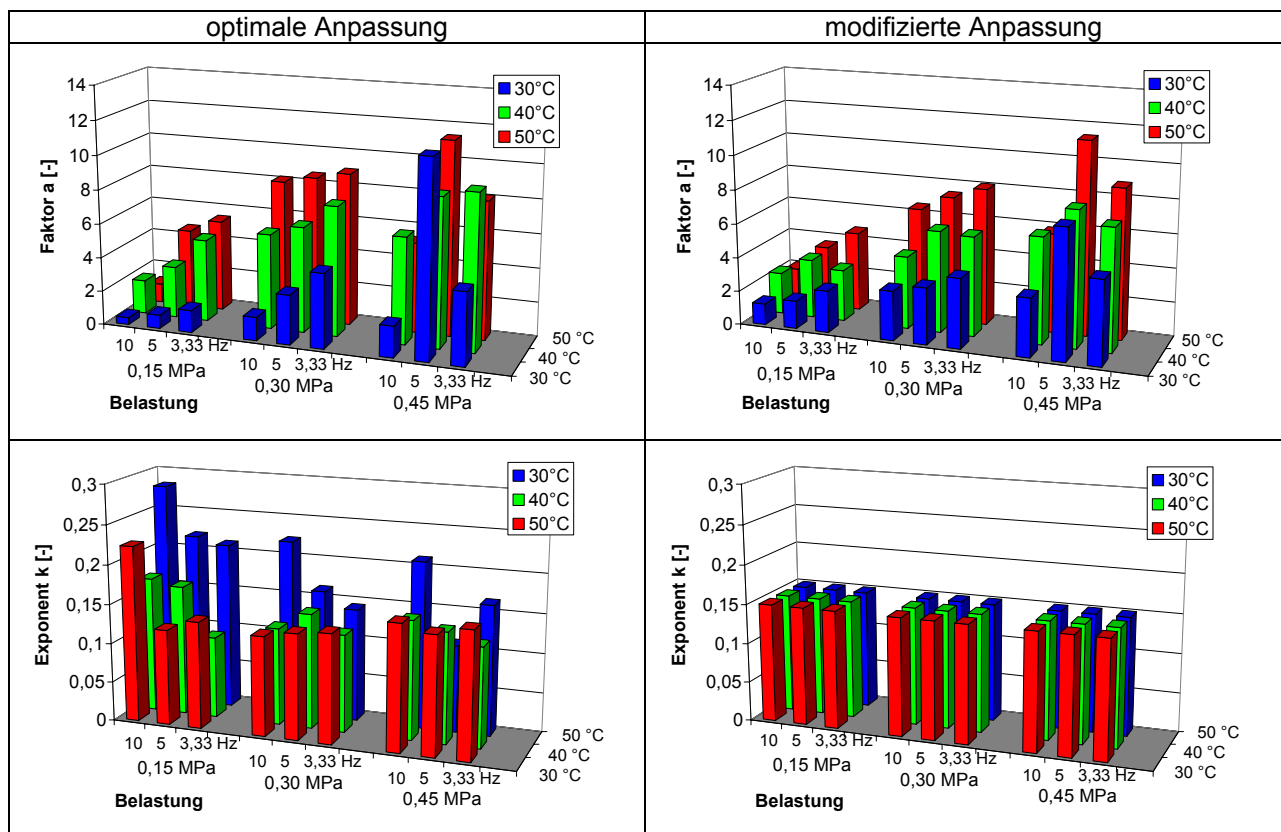


Abb. 4-94: Abhängigkeiten des Faktors a und des Exponenten k der Approximationsgleichung 4-17 von den jeweiligen Prüfbedingungen – DSV (AB)

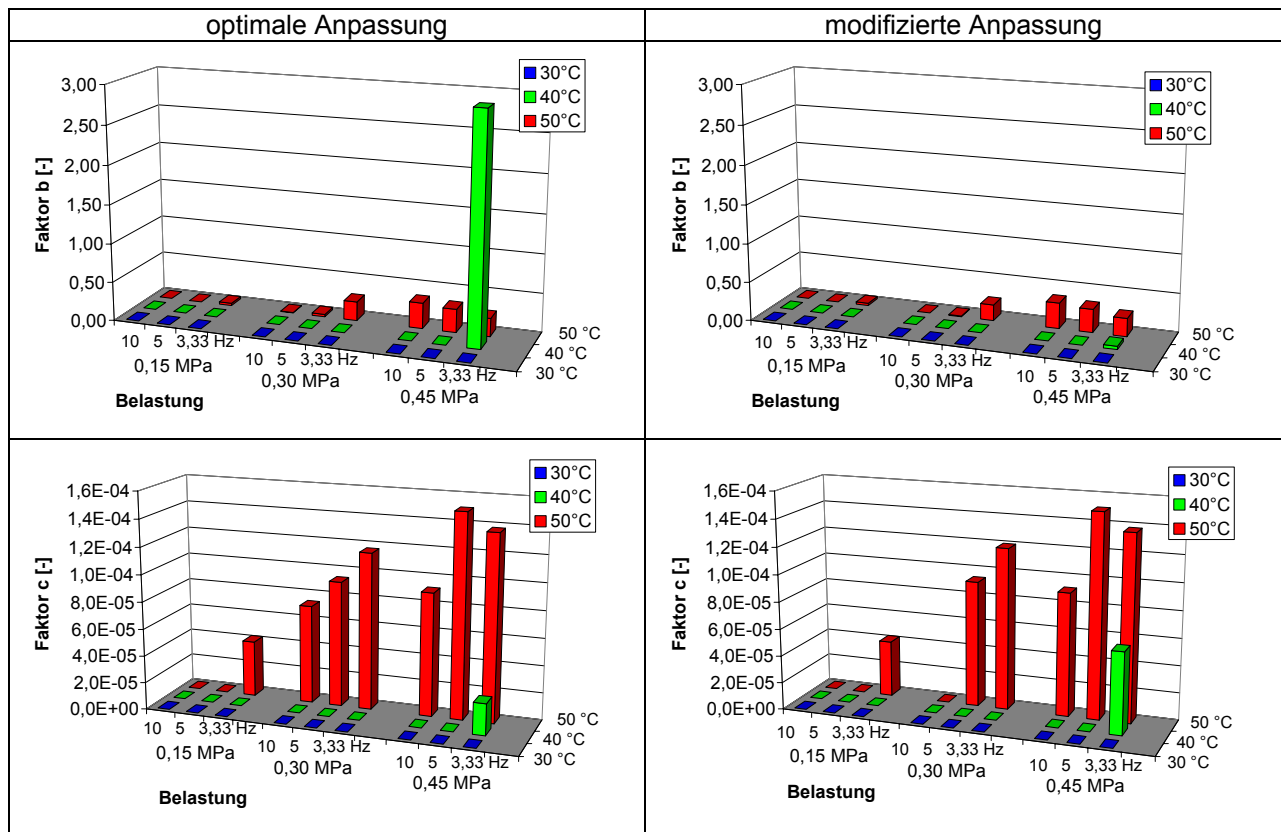


Abb. 4-95: Abhängigkeiten des Faktors b und des Exponenten c der Approximationsgleichung 4-17 von den jeweiligen Prüfbedingungen – DSV (AB)

Als optimale Anpassung wird die Approximation bezeichnet, bei der das höchste für die verwendete Gleichung erreichbare Bestimmtheitsmaß berechnet wurde. Der Faktor a der optimalen Anpassung, zeigt mit Ausnahme von ein paar Ausreißern Abhängigkeiten hinsichtlich des Temperatur-, Frequenz- und Lasteinflusses. Bei dem Exponenten k konnten keine plausiblen Abhängigkeiten gefunden werden. Der Faktor b und der Exponent c beschreiben den ansteigenden Ast am Ende der Dehnungskurve. Da nicht bei allen einaxialen Druckschwellversuchen Wendepunkte und damit progressiv zunehmende Dehnungen am Ende des Versuchs auftraten, erreichen die Variablen b und c bei der Approximation dieser Dehnungskurven den Wert Null. In einem weiteren Untersuchungsschritt, im Folgenden als modifizierte Approximation bezeichnet, wurde der Exponent k mit einem konstanten Faktor von 0,15 angenommen. Die Ergebnisse dieser modifizierten Approximation sind denen der optimalen in der Abbildung 4-94 und 4-95 gegenübergestellt. Für die Faktoren a und b sowie für den Exponenten c ergeben sich dadurch deutlichere Abhängigkeiten von den jeweiligen Beanspruchungsgrößen.

Durch den konstant angenommenen Exponenten k werden für die Bestimmtheitsmaße der Approximationen bei einigen Dehnungskurven kleinere Werte als bei der Approximation ohne Vorgabe von k erreicht, siehe Abbildung 4-96.

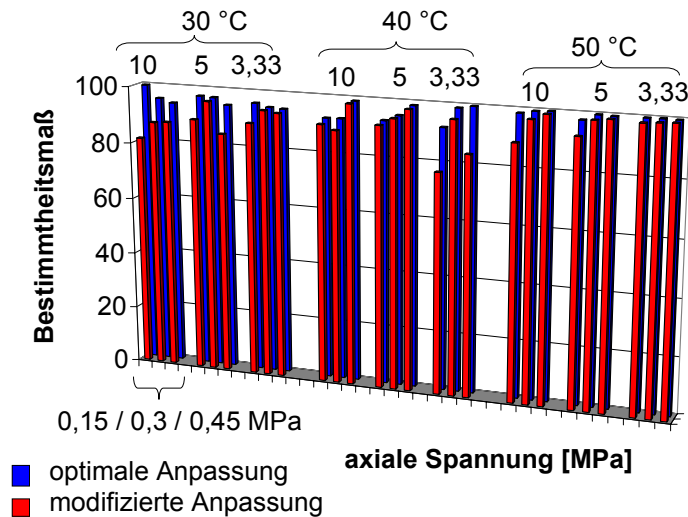


Abb. 4-96: Bestimmtheitsmaße der Approximationen ohne und mit Vorgabe des Exponenten k – DSV (AB)

Die mit dem dynamischen Triaxialversuch und dem dynamischen Stempleindringversuch ermittelten axialen Dehnungskurven wurden mit der gleichen Vorgehensweise ohne und mit Vorgabe des Exponenten k approximiert. Der Term in der Gleichung 4-17, der die Schädigung und damit den Anstieg der Kurve in der dritten Phase beschreibt, konnte bei der Approximation der Dehnungskurven vernachlässigt werden, da dieses Verformungsverhalten bedingt durch den seitlichen Stützdruck bzw. durch das umgebende Material bei den durchgeführten Versuchen nicht auftrat. Durch die Vorgabe des Exponenten k verringern sich einerseits die Bestimmtheitsmaße der Approximation, aber andererseits bildet sich die Last-, Frequenz- und Temperaturabhängigkeit des Faktors a stärker aus, wie es auch bei der Approximation der mit dem einaxialen Druckschwellversuchen ermittelten Dehnungskurven festgestellt wurde.

In der folgenden Abbildung sind die Abhängigkeiten von den Beanspruchungsgrößen Last, Temperatur und Frequenz des Faktors a und die festgelegte Größe des Exponenten k der Approximationsgleichung 4-17 der drei untersuchten Prüfverfahren gegenübergestellt.

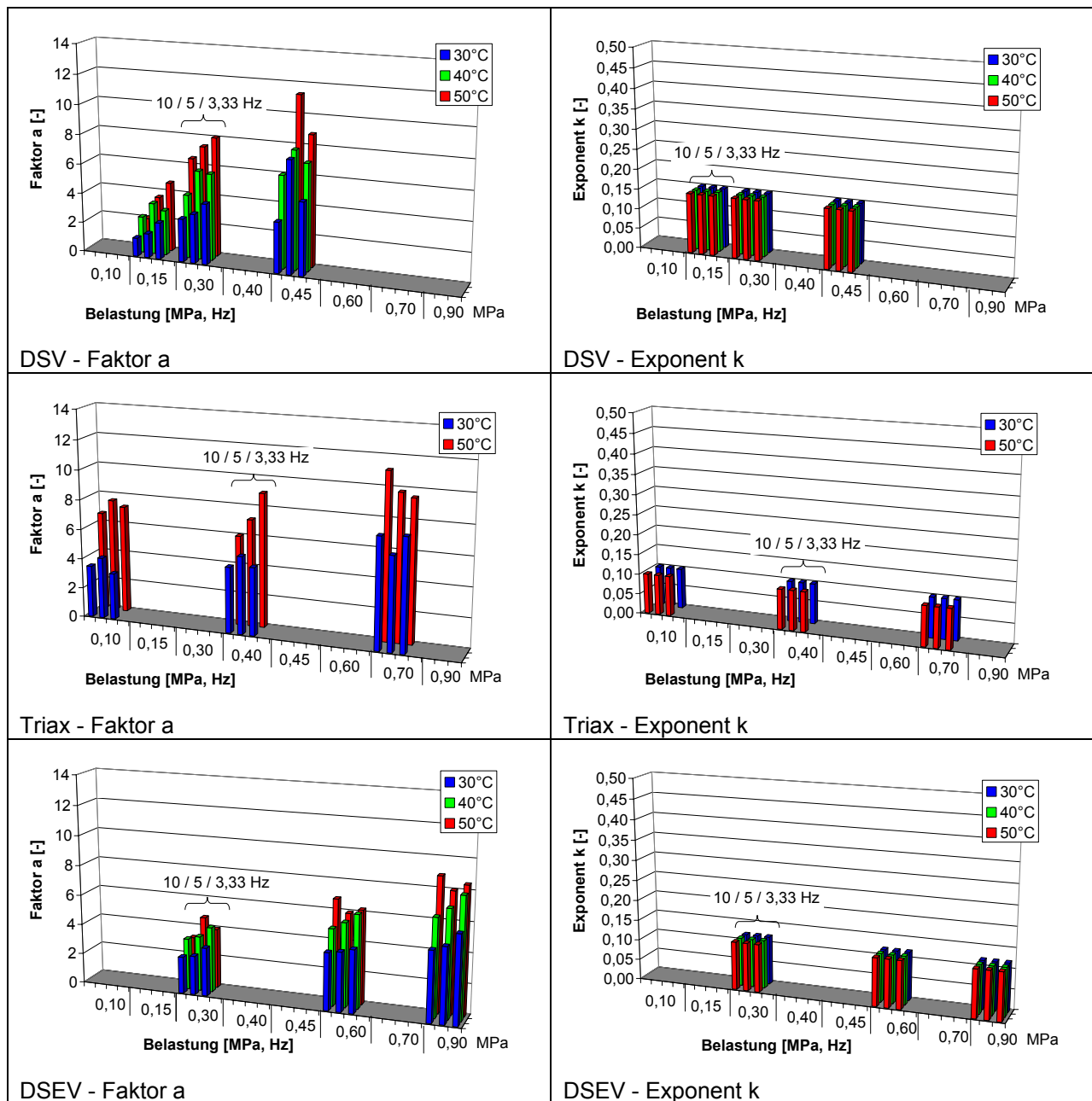


Abb. 4-97: Abhängigkeiten des Faktors a und des Exponenten k der Approximationsgleichung 4-17 von den jeweiligen Prüfbedingungen – DSV, Triax, DSEV (AB)

Der Exponent k wurde auf der Grundlage der vorangegangenen Ergebnisse der Approximationen ohne Vorgabe von k festgelegt. Der Mittelwert dieser Größe lag bei allen Beanspruchungsgrößen sowohl bei den dynamischen Triaxialversuchen als auch bei den dynamischen Stempleindringversuchen bei 0,1.

Ob der Faktor k bei diesen geprüften Beanspruchungsgrößen als konstant angenommen werden kann, ist in einer vertieften Parameterstudie zu klären.

Je Prüfverfahren werden mit dieser Approximationsgleichung plausible Abhängigkeiten des Faktors a von der Last, der Temperatur und der Frequenz ermittelt.

Werden die Werte des Faktors a , ermittelt mit unterschiedlichen Prüfverfahren, verglichen, ist zunächst keine Abhängigkeit bei alleiniger Betrachtung der axialen Spannung festzustellen. Die Ursache liegt darin begründet, dass die Spannungszustände im Probekörper und die Randbedingungen der einzelnen Versuche, die sich entscheidend auf das Verformungsverhalten auswirken, unterschiedlich sind.

Bei dem dynamischen Stempeleindringversuch wird ein inhomogener Spannungszustand im Probekörper erzeugt, bedingt durch die nicht vollflächig belastete Probekörperoberfläche und das stützend umgebende Material. Bei dem einaxialen Druckschwellversuch herrscht ein einaxialer und bei dem dynamischen Triaxialversuch ein dreiaxialer Spannungszustand im Probekörper.

Um Abhängigkeiten des Faktors a bzw. des Exponenten k der verschiedenen Versuche zu beschreiben, ist der dreidimensionale Spannungszustand zu betrachten, siehe Abbildung 4-98.

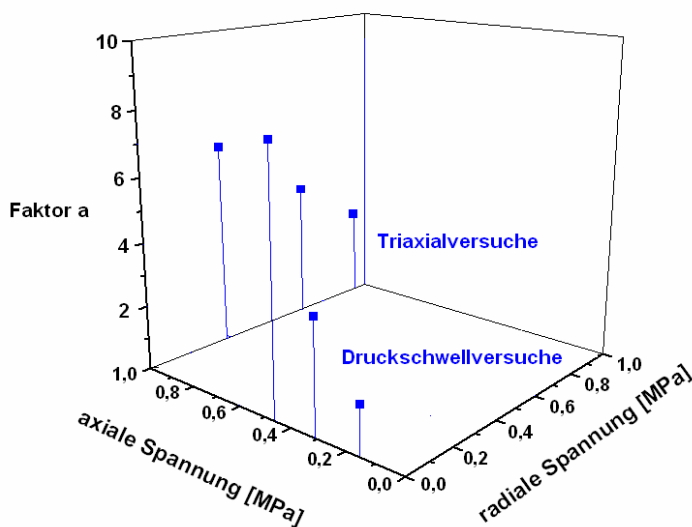


Abb. 4-98: Abhängigkeiten des Faktors a , ermittelt mit dem einaxialen Druckschwellversuch und dem dynamischen Triaxialversuch, von der Spannung (AB)

Die dreidimensionale Darstellung zeigt, dass eine Flächenfunktion erforderlich ist, um die Abhängigkeiten des Faktors a bzw. des Exponenten k von dem Spannungszustand zu beschreiben. Um eine solche Funktion zu entwickeln und deren Genauigkeit auch im mittleren Bereich zu erhöhen, werden weitere Stützpunkte/ Messdaten benötigt, die im Rahmen dieser Arbeit nicht ermittelt wurden. Diese erforderlichen Daten lassen sich bisher nur mit den Triaxialversuchen ermitteln, da bei diesem Prüfverfahren gezielte radiale Spannungen erzeugt werden können.

Mit Flächenfunktionen für die Variablen a und k bei verschiedenen Temperaturen und Frequenzen und der Finite-Elemente-Methode ist es möglich, jeden beliebigen Spannungszustand im Probekörper zu berechnen.

Die mit der Approximationsgleichung 4-17 erfolgte Auswertungen in diesem Kapitel wurden für die Gleichungen 4-18 und 4-19 ebenfalls durchgeführt. Aufgrund der weiteren Variablen in den Gleichungen waren die Abhängigkeiten der Faktoren und Exponenten von den jeweiligen Prüfbedingungen nicht so eindeutig wie die bei denen der Gleichung 4-17.

5 INTERPRETATION DER UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE

In den folgenden zwei Kapiteln werden die Ergebnisse der Prüfverfahren sowie das ermittelte Ranking hinsichtlich des Verformungswiderstandes der untersuchten Asphalte verglichen.

Hierbei werden die Einflüsse jedes Prüfverfahrens auf die Ergebnisse betrachtet, die sich sowohl auf die elastischen und viskoelastischen als auch auf die bleibenden Verformungskennwerte auswirken.

5.1 ELASTISCHE UND VISKOELASTISCHE VERFORMUNGEN – VERGLEICH DER PRÜFVERFAHREN

Der absolute Elastizitätsmodul bzw. Steifemodul wurde mit den drei Prüfverfahren und der Berechnungsmethode nach Francken und Verstraeten bei unterschiedlichen Beanspruchungskombinationen ermittelt, siehe Abbildung 5-1.

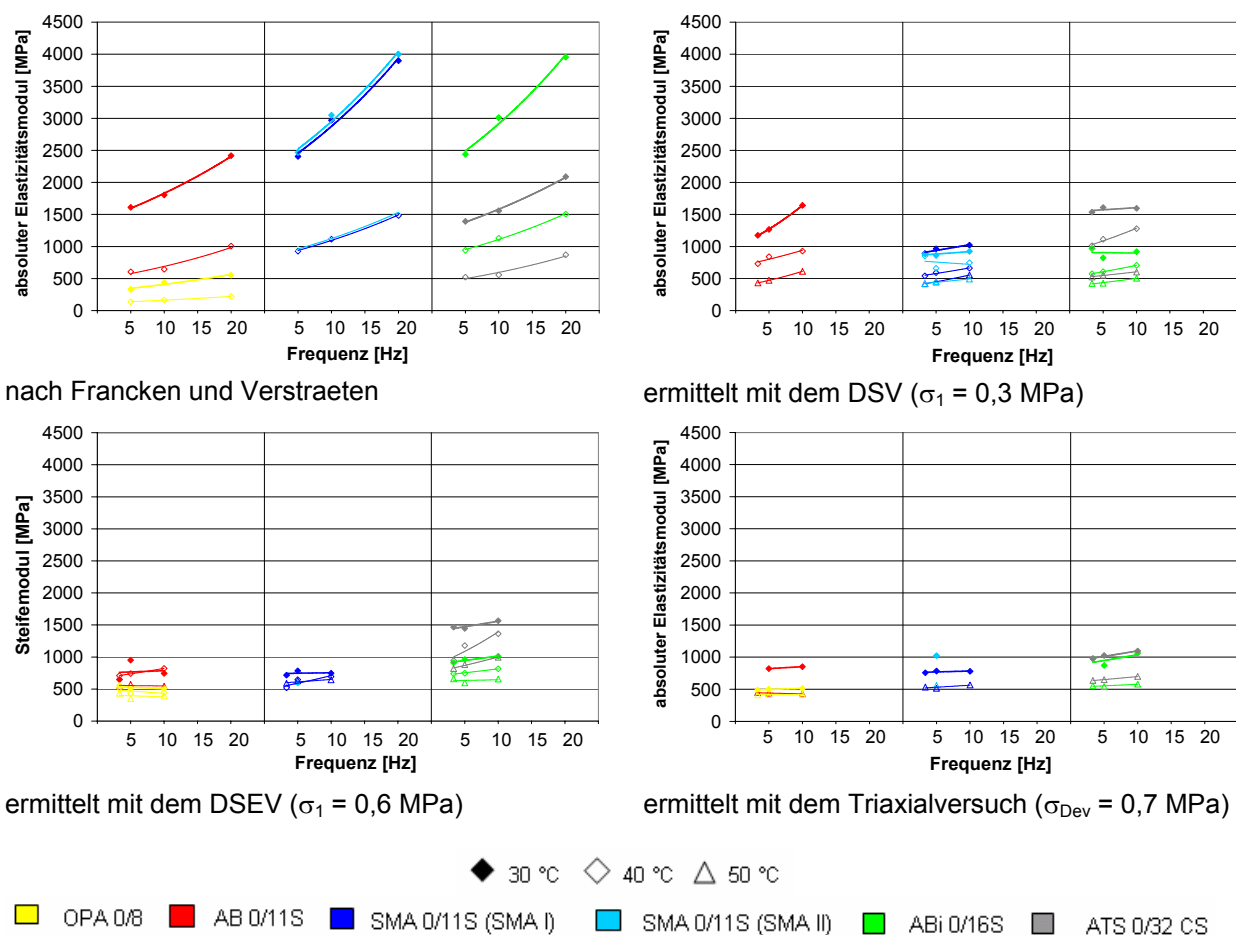


Abb. 5-1: Vergleich der absoluten Elastizitätsmoduln/ Steifemoduln, ermittelt mit DSV, Triax, DSEV sowie berechnet nach Francken und Verstraeten

Die berechneten Werte zeigen im Vergleich zu den experimentell ermittelten Werten höhere Frequenz- und Temperaturabhängigkeiten.

Ein geringer Frequenzeinfluss ist bei den absoluten Elastizitätsmoduln, die mit dem einaxialen Druckschwellversuch ermittelt wurden, zu erkennen. Die mit dem dynamischen Stempелеindringversuch ermittelten Steifemoduln und die aus den dynamischen Triaxialversuchen abgeleiteten absoluten Elastizitätsmoduln zeigen kaum einen Frequenzeinfluss. Der geringe Einfluss der Frequenz ist zum einen auf die behinderte Seitendehnung und zum anderen auf die gewählten Prüftemperaturen zurückzuführen. Die behinderte Seitendehnung resultiert aus dem umgebenden Material beim dynamischen Stempелеindringversuch und dem radial aufgebrachtten Stützdruck beim Triaxialversuch. Die in dieser Arbeit gewählten Prüftemperaturen (30 °C bis 50 °C) bewirken einen kleineren Frequenzeinfluss auf die Verformungsmoduln, als es z. B. bei tieferen Prüftemperaturen der Fall ist, siehe Abbildung 4-23.

Hinsichtlich des Ranking der untersuchten Asphaltvarianten zeigen die nach Francken und Verstraeten berechneten absoluten Elastizitätsmoduln bedingt durch die höheren Absolutwerte eine differenziertere Abstufung als die der experimentell bestimmten. Danach besitzt die offenporige Asphaltvariante die geringsten Werte, gefolgt Asphalttragschicht und Asphaltbeton. Die höchsten Werte werden für die beiden Splittmastixvarianten und den Asphaltbinder ermittelt.

Bei der Rangfolge der experimentell bestimmten Werte werden bei allen drei Prüfverfahren die höchsten absoluten Elastizitätsmoduln für die Asphalttragschicht erreicht. Die geringsten Kennwerte werden, wie schon bei dem Berechnungsverfahren nach Francken und Verstraeten, für den OPA mit dem Triaxialversuch und dem dynamischen Stempелеindringversuch ermittelt. Der einaxiale Druckschwellversuch eignet sich für offenporige Asphaltvarianten aufgrund des hohen Hohlraumgehaltes nicht zur Materialkennwertbestimmung, siehe Kapitel 3.2.2.

Die absoluten Elastizitätsmoduln des Asphaltbinders, der beiden Splittmastixvarianten und des Asphaltbetons zeigen bei allen drei Prüfverfahren keine wesentlichen Unterschiede, so dass sie ohne weitere Wertung den mittleren Bereich des Ranking bilden.

Eine weitere viskoelastische Kenngröße stellt der Phasenwinkel oder wie in Kapitel 4.2 erläutert die Phase dar. Mit allen drei Prüfverfahren konnte ein deutlicher Frequenzeinfluss auf die gemessene Phase nachgewiesen werden, siehe Abbildung 5-2.

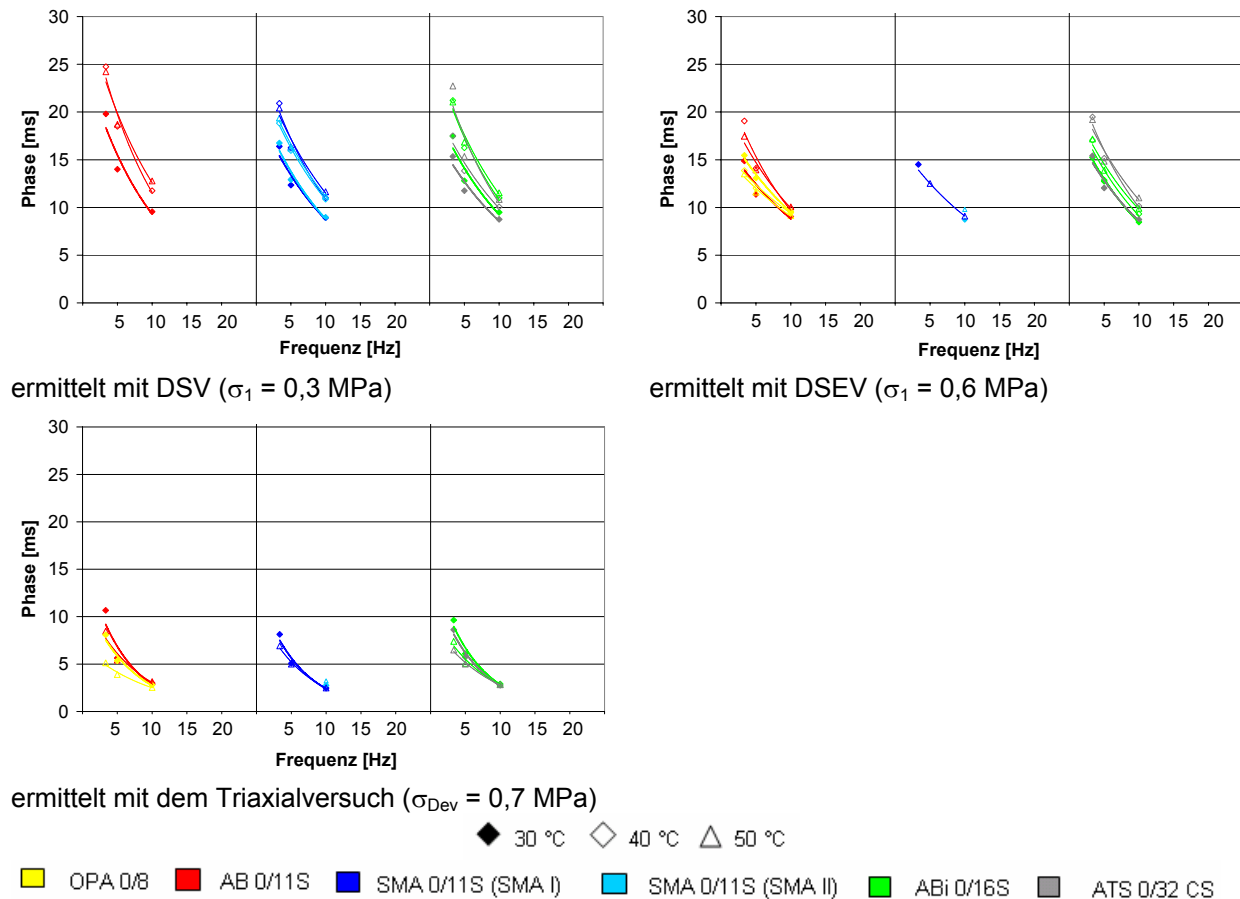


Abb. 5-2: Vergleich der Prüfverfahren – Phase

Diese Größe unterscheidet sich bei einem Ranking der verschiedenen Asphalte je Prüfverfahren kaum. Auffällig ist, dass kleinere Phasen mit dem Triaxialversuch ermittelt werden als mit dem dynamischen Stempleindringversuch und dem einaxialen Druckschwellversuch. Eine Begründung liefert die Spannungsabhängigkeit der Phase, die an einer Versuchsreihe des einaxialen Druckschwellversuche mit Variation der axialen Spannung gezeigt wird, siehe Abbildung 5-3.

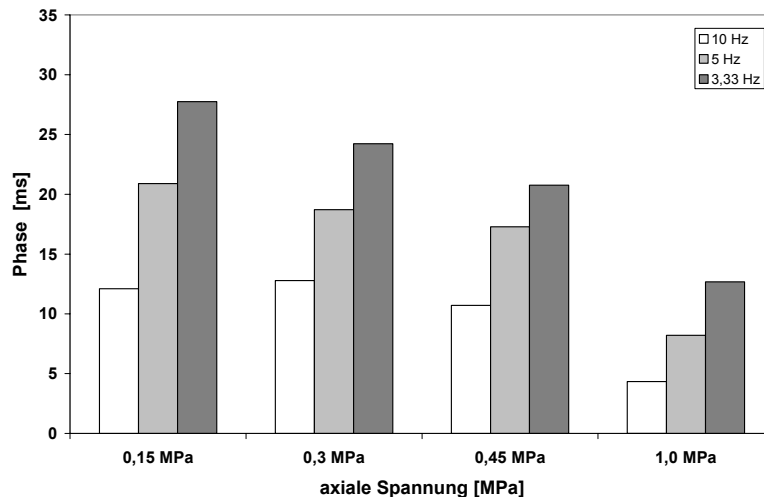


Abb. 5-3: Phase, ermittelt mit dem DSV bei unterschiedlicher axialer Spannung

Mit steigender axialer Spannung sinkt die Phase bei allen geprüften Frequenzen.

Die aus den dynamischen Triaxialversuchen abgeleiteten Phasen wurden mit Hilfe der Deviatorspannung (siehe Kapitel 4.3.3.1) ausgewertet. Die Deviatorspannung ist die Differenz der konstant bei allen durchgeführten Versuchen aufgebrachten axialen Spannung von 1,0 MPa und der variablen radialen Spannung von 0,3 bis 0,9 MPa. Durch die hohen axialen Spannungen verringert sich bei diesem Prüfverfahren der Zeitraum zwischen dem Maximum der axialen Spannung und der axialen Dehnung mehr als bei den anderen Prüfverfahren.

Um diese Spannungsabhängigkeit der Phase eindeutig mathematisch zu beschreiben, reicht eine zweidimensionale Betrachtung der Ergebnisse nicht mehr aus. Es ist notwendig die Ergebnisse wie in Abbildung 4-98 in einem dreidimensionalen Raum über σ_1 und $\sigma_{2/3}$ darzustellen und die Abhängigkeit über eine Flächenfunktionen zu beschreiben.

5.2 BLEIBENDE VERFORMUNGEN – VERGLEICH DER PRÜFVERFAHREN

Ein Vergleich der bleibenden axialen Dehnungen nach 16.000 Lastwechseln ermittelt mit den drei verschiedenen Prüfverfahren ist in der Abbildung 5-4 dargestellt.

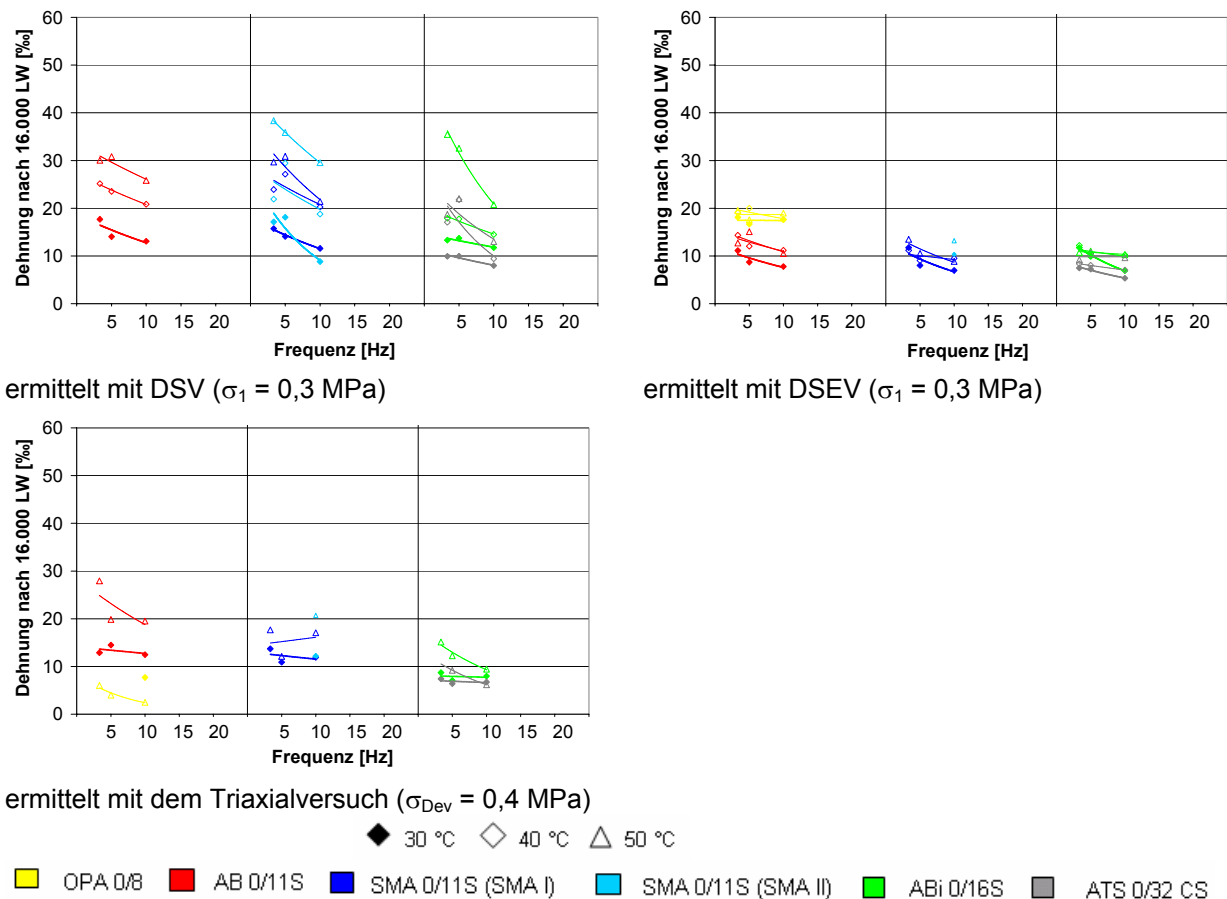


Abb. 5-4: Vergleich der Prüfverfahren – bleibende axiale Dehnung nach 16.000 Lastwechsel

Für diesen Vergleich wurden die Ergebnisse zusammengetragen, die bei 0,3 MPa axialer Spannung (einaxialer Druckschwellversuch und dynamischer Stempeleindringversuch) und bei einer Deviatorspannung von 0,4 MPa (dynamischer Triaxialversuch) ermittelt wurden.

Bedingt durch das stützend umgebende und nicht belastete Material beim dynamischen Stempeleindringversuch fallen die Dehnungen sowie der Temperatur- und Frequenzeinfluss geringer aus als bei den einaxialen Druckschwellversuchen.

Hinsichtlich des Mischgutvergleichs wird mit beiden Prüfverfahren (DSV, DSEV) das Asphalttragschichtmischgut als das widerstandsfähigste gegenüber Verformungen beurteilt. Der Asphaltbeton, die beiden Splittmastixvarianten sowie der Asphaltbinder unterscheiden sich je Prüfverfahren (DSV, DSEV) nur gering voneinander. Die

offenporige Asphaltvariante weist bei dem dynamischen Stempeleindringversuch den geringsten Verformungswiderstand auf.

Das beim dynamischen Stempeleindringversuch gemessene Materialverhalten der offenporigen Asphaltvariante wird durch die Ergebnisse der Triaxialversuche nicht bestätigt. Der offenporige Asphalt zeigt gegenüber den übrigen Asphalten den größten Verformungswiderstand. Die Ergebnisse der Triaxialversuche dürfen allerdings bei diesem Vergleich nicht ohne Beachtung der radialen Dehnungen beurteilt werden. Bei dem betrachteten Spannungszustand treten beim offenporigem Asphalt radiale Stauchungen auf (siehe Kapitel 4.3.2), wodurch die axialen Dehnungen minimiert werden.

Ein Grund für die voneinander abweichenden Ergebnisse der verschiedenen Prüfverfahren sind die unterschiedlichen Beanspruchungszustände in den Probekörpern und die dementsprechend unterschiedlichen Reaktion der Asphalte. Beim einaxialen Druckschwellversuch herrscht ein einaxialer Spannungszustand während beim dynamischen Triaxialversuch und dem dynamischen Stempeleindringversuch ein dreiaxialer Spannungszustand vorhanden ist.

Die Geometrien der bei den einaxialen Druckschwell- und dynamischen Triaxialversuchen verwendeten Probekörper sind ein weiterer Grund für die Abweichungen der Versuchsergebnisse der verschiedenen Prüfverfahren untereinander. Durch das geringe h/d -Verhältnis von 0,8 und der auftretenden Endflächenreibung zwischen Probekörper und Belastungseinrichtung, die in den Lasteinleitungsbereichen sogenannte Spannungskeile mit stützender Wirkung hervorrufen, vergrößert sich der Verformungswiderstand der Probekörper um eine unbekannte Größe.

Um diese Einflüsse bei der Bewertung der untersuchten Asphalte zu berücksichtigen und damit das wirkliche Materialverhalten zu erfassen, ist es hilfreich, die Versuche mit den jeweiligen Randbedingungen nachzurechnen z.B. mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode, bei der die rechnerischen Ergebnisse mit den Versuchsdaten abzugleichen sind. Für diese Simulation werden Spannungs- Dehnungsbeziehungen der entsprechenden Asphalte benötigt, die in dieser Arbeit bestimmt wurden.

6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In Deutschland werden derzeit Straßenbefestigungen nach den Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen (RStO) bemessen. Da die auf empirischer Grundlage basierenden Verfahren der RStO wegen den steigenden Anforderungen an eine genaue und vorausschauende Planung nicht ausreichend sind, wurde ein analytisches Verfahren zur Dimensionierung von Straßenbefestigungen entwickelt [Wellner, Leutner 2007].

Mit diesem Verfahren kann mit den mischgutspezifischen Spannungs-Dehnungsverläufen in einer Fahrbahnbefestigung und den verschiedenen Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit einer Straßenbefestigung der Widerstand gegen Ermüdung, Rissbildung und Verformung hinsichtlich des Befestigungsaufbaus optimiert werden.

Um die Spannungs-Dehnungsverläufe realitätsnah zu beschreiben, gilt es, für die Stoffmodellierung präzise Eingangsparameter zu bestimmen. Ziel dieser Arbeit war es, Materialkennwerte für das Verformungsverhalten von Asphalt unter Druckbeanspruchung bei hohen Temperaturen zu ermitteln. Mit dieser Grundlage für analytische Dimensionierungsverfahren ist es möglich, das Verformungsverhalten von Asphalt präzise prognostizieren zu können und damit schon in der Planungsphase der Gefahr der Spurrinnenbildung entgegenzuwirken.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden mit drei unterschiedlichen Prüfverfahren – einaxialer Druckschwellversuch, dynamischer Triaxialversuch, dynamischer Stempeleindringversuch – für die Dimensionierung erforderliche Eingangswerte an vier verschiedenen Asphaltdeckschichtvarianten, einer Asphaltbinder- sowie einer Asphalttragschichtvariante bestimmt.

Asphalt weist ein elastisches, viskoses und plastisches Verformungsverhalten auf, das außerdem noch abhängig von Temperatur, Frequenz und Last ist. Daher wurden im Prüfprogramm diese drei Größen systematisch variiert.

Zum Vergleich des Verformungswiderstandes wurden zusätzlich Spurbildungsversuche durchgeführt.

Die ausgewählten Prüfverfahren unterscheiden sich hinsichtlich der Probekörpergeometrie und der im Probekörper herrschenden Spannungszustände. Entsprechend der Forderung, dass während des Versuchs ein homogener Spannungszustand im

Probekörper herrschen muss, um Materialkennwerte zu bestimmen, eignen sich nur der einaxiale Druckschwellversuch und der dynamische Triaxialversuch aus der Versuchsreihe zur Bestimmung von Materialkennwerten. Die weiteren Prüfverfahren eignen sich gerade aufgrund des inhomogenen Spannungszustandes im Probekörper zur Validierung von Stoffmodellen und nicht zur Bestimmung von Materialkennwerten.

Vorversuche (einaxiale Druckschwellversuche, dynamische Triaxialversuche), die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden, zeigen, dass verschiedene Randbedingungen wie die Reibung zwischen Laststempel und Probekörperendfläche sowie das Verhältnis der Höhe des Probekörpers zum Durchmesser einen Einfluss auf den Spannungszustand im Probekörper haben. Durch diese Randbedingungen werden während des Versuchs Spannungen im Lasteinleitungsbereich erzeugt, wodurch der homogene Spannungszustand in diesen Bereichen im Probekörper verhindert und somit das Verformungsverhalten beeinflusst wird.

Eine Eliminierung dieser Effekte bei der Verformungsmessung kann mit Messsystemen realisiert werden, die direkt am Probekörper die Verformungen des mittleren Probekörperbereiches erfassen. Hierzu wurde mit Hilfe der Voruntersuchungen eine Lösungsmöglichkeit für einaxiale Druckschwellversuche entwickelt und die Herstellung der dafür notwendigen schlanken Probekörper optimiert.

Bei Prüfverfahren mit sinusförmiger Druckschwellbelastung wird die gemessene bleibende Dehnung (Impulskriechkurve) von einer sinusförmig schwingenden Dehnungsreaktion überlagert. Die Amplitude dieser schwingenden Dehnungsreaktion setzt sich aus einem elastischen und einem viskoelastischen Anteil zusammen. Die Amplitude und die Phasenverschiebung der Dehnung zu der aufgebrachten Spannung bilden die Grundlage der Auswertung des elastischen und viskoelastischen Verformungsverhaltens.

Für die einaxialen Druckschwellversuche und dynamischen Triaxialversuche wurden mit diesen Größen, die unter verschiedenen Beanspruchungskombinationen (Temperatur, Frequenz, Last) ermittelt wurden, die Kennwerte absoluter Elastizitätsmodul IEI , Phasenwinkel Φ der axialen Spannung zur axialen Dehnung sowie die Querdehnzahl μ berechnet, ausgewertet und analysiert.

Um das elastische und viskoelastische Verformungsverhalten - ermittelt mit dem dynamischen Stempeleindringversuch - zu beschreiben, wurden die Kennwerte Steifemodul E_S und Phasenwinkel ausgewählt.

Bei der Auswertung der ermittelten Phasenwinkel zeigte sich, dass diese eine andere Abhängigkeit von der Frequenz aufweisen als es aus reinen Bitumenuntersuchungen bekannt ist. Dieses Verhalten konnte im Rahmen der Arbeit mit den in der klassischen Rheologie gebräuchlichen Modellansätzen begründet werden. Als Schlussfolgerung ist aus den Ergebnissen zu ziehen, dass der Zeitraum zwischen dem Maximum der axialen Spannung und dem Maximum der axialen Dehnung bei Druckschwellversuchen ohne Lastpause nicht als Phasenwinkel in $[\circ]$, sondern als Phase in [ms] angegeben werden muss.

Zur Berechnung der Elastizitätsmoduln werden nach [FGSV 2006] vereinfacht die Maxima der schwellenden Druckbeanspruchung und die Maxima der schwingenden Dehnungsreaktion angesetzt. Für eine präzise Bestimmung der Materialkennwerte als Eingangsgrößen für Stoffmodelle, ist die schwingende Dehnungsreaktion in elastische und viskoelastische Anteile aufzuteilen. Dies erfolgte im Rahmen dieser Arbeit mit verschiedenen Lösungsansätzen.

Durch jeden Lastwechsel werden bleibende Dehnungen hervorgerufen, deren Addition eine Dehnungskurve ergibt. Für die Ermittlung von Materialkennwerten ist der Kurvenverlauf der bleibenden Dehnung in der ersten und zweiten Phase von besonderer Bedeutung. Da in der dritten Phase eine Zerstörung des Probekörpers erfolgt, kann keine Aussage zum Materialverhalten in situ getroffen werden.

An den in dieser Arbeit mit dynamischen Triaxialversuchen und dynamischen Stempeleindringversuchen ermittelten Dehnungskurven konnten bedingt durch die behinderte Seitendehnung, die zum Einen aus dem umgebenden Material beim dynamischen Stempeleindringversuch und zum Anderen aus dem radial aufgebrachtten Stützdruck beim Triaxialversuch resultiert, keine dritte Phase gemessen werden. Die Einflüsse aus Temperatur, Frequenz und Last auf die Dehnungsrate und die bleibende Dehnung wurden für die untersuchten Asphaltvarianten mit den unterschiedlichen Prüfverfahren ausgewertet und analysiert.

Um nicht nur punktuell die ermittelten Dehnungen zu bewerten, wurden die Dehnungsverläufe mit unterschiedlichen mathematischen Ansätzen approximiert.

Es konnten Abhängigkeiten der Faktoren und Exponenten der untersuchten Gleichungen von den jeweiligen Prüfbedingungen gefunden werden, mit denen das Verformungsverhalten von Asphalt beurteilt und prognostiziert werden kann.

Ein Vergleich der je Prüfverfahren ermittelten Kennwerte der bleibenden sowie elastischen und viskoelastischen Dehnung zeigt, dass eine Abhängigkeit bei alleiniger Betrachtung dieser Kennwerte über die axiale Spannung nicht feststellbar ist. Die Ursache liegt darin begründet, dass die Spannungszustände im Probekörper und die Randbedingungen der einzelnen Versuche, die sich entscheidend auf das Verformungsverhalten auswirken, unterschiedlich sind.

Bei dem dynamischen Stempeleindringversuch wird ein inhomogener Spannungszustand im Probekörper erzeugt, bedingt durch die nicht vollflächig belastete Probekörperoberfläche und das stützend umgebende Material. Bei dem einaxialen Druckschwellversuch herrscht ein einaxialer und bei dem dynamischen Triaxialversuch ein dreiaxialer Spannungszustand im Probekörper.

Um die Kennwerte ermittelt mit unterschiedlichen Prüfverfahren zu vergleichen, reicht eine zweidimensionale Betrachtung der Ergebnisse nicht mehr aus. Die Kennwerte müssen entsprechend dem bei der Ermittlung herrschenden Spannungszustand über die axiale und radiale Spannung aufgetragen werden. Über Flächenfunktionen lassen sich dann die Abhängigkeiten der in unterschiedlichen Prüfverfahren ermittelten Kennwerte beschreiben. Um die Genauigkeit dieser Flächenfunktionen im mittleren Bereich zu erhöhen und damit das Verformungsverhalten von Asphalt eindeutiger zu beschreiben, werden weitere Stützpunkte benötigt, die sich nur mit Hilfe von Triaxialversuchen bestimmen lassen, da dies bisher das einzige Prüfverfahren ist, bei dem gezielt radiale Spannungen erzeugt werden können.

Eine umfassende Dokumentation der Versuchsergebnisse ist im Anhang dieser Arbeit zu finden, die als Grundlage (Datenbank) für weitere Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet dienen kann.

7 LITERATUR

7.1 REGELWERKE

[FGSV 1999]

TP A-StB Teil: Einaxialer Druckschwellversuch – Bestimmung des Verformungsverhaltens von Walzasphalten bei Wärme
FGSV Verlag Köln, 1999

[FGSV 2001]

Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Fahrbahndecken aus Asphalt – ZTV Asphalt-StB 01
FGSV Verlag Köln, 2001

[FGSV 2003]

Entwurf einer Technischen Prüfvorschriften für Asphalt im Straßenbau TP A-StB Teil Dynamischer Stempfeindringversuch (DSEV) – Bestimmung des Verformungswiderstandes von Walzasphalten bei Wärme,
Bearbeitungsstand 2003

[FGSV 2006]

Arbeitspapier Nr. 65 Mechanisches Verhalten von Asphalt in Befestigungen für Verkehrsflächen – Eingangsgrößen in die Bemessung (Materialkennwerte)
FGSV Verlag Köln, 2006

DIN EN 12697-25 (2005) Asphalt – Prüfverfahren für Heißasphalt – Teil 25: Druckschwellversuch; Deutsche Fassung Juli 2005

DIN EN 13108-20 (2006) Asphaltmischgut – Mischgutanforderungen – Teil 20: Erstprüfung; Deutsche Fassung Juli 2006

DIN 1342-1 (2003) Viskosität Teil 1: Rheologische Begriffe

Entwurf TPA-22, Technische Prüfvorschrift für Asphalt Teil 22 Spurbildungsversuch, 2007

7.2 LITERATUR

[Arand 1996]

Arand, W.; v. d. Decken, St.:

Schlussbericht zum FA Pilotphase Qualitätssicherung in der Querschnittsforschung Qualitätsplanung im Asphaltbau – behandelt am Beispiel des Verformungswiderstandes

AiF – Forschungsauftrag Q27, Braunschweig 1996

[Clyne 2003]

Clyne, T. R.; Xinjun Li; Marasteanu, M. O.; Skok, E. L.:

Dynamic and Resilient Modulus of Minnesota Department of Transportation Asphalt Mixtures

Final Report, Department of Civil Engineering, University of Minnesota

Minneapolis, 2003, USA

[Francken 1974]

Francken, L.; Verstraeten, J.:
Methods for predicting moduli and fatigue laws of bituminous road mixes under repeated bending
Transportation Research Record 515, pp. 114-123
Washington D.C., 1974, USA

[Hagner 2003]
Hagner, T.:
Untersuchung und Bewertung von bitumenhaltigen Bindemitteln für Asphalt mittels Dynamischen Scher-Rheometer
Schriftenreihe des Instituts für Straßenwesen, Heft 19, 2003

[Hiersche 1992]
Hiersche, E.-U. et al.:
Schlussbericht zum FA Einheitliche Prüf- und Auswertekriterien im dynamischen Druckschwellversuch im Hinblick auf die Entwicklung eines standardisierten dynamischen Prüfgerätes
Forschungsauftrag Nr. 7.142 G 88 E des Bundesministers für Verkehr, Karlsruhe 1992

[Hou 1996]
Xiaosong Hou, M.E.:
Analyse der bleibenden Verformungen des Asphaltes unter statischer und dynamischer Belastung zur Vorhersage von Spurrinnen
Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt, 1996

[Hürtgen 2000]
Hürtgen, H.:
Methoden zur Beschreibung der thermomechanischen Eigenschaften von Asphalt (Asphalt-Rheologie)
Schriftenreihe des Fachgebietes Konstruktiver Straßenbau im Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau der Universität Hannover; Heft 20
Hannover, 2000, Deutschland

[Hürtgen 1982]
Hürtgen, H.:
Bestimmung des Elastizitätsmoduls von Asphalt aus konventionellen Mischgut- und Bindemitteldaten, Bitumen 2, 1982

[Huschek 1983]
Huschek, S.:
Zum Verformungsverhalten von Asphaltbeton unter Druck,
München, 1983, Deutschland

[Karcher 2005]
Karcher, C.:
Prognose und Bewertung des Verformungsverhalten von Asphalten mit dem Druckschwellversuch am Beispiel des Splittmastixasphaltes
Veröffentlichungen des Institutes für Straßen- und Eisenbahnwesen der Universität Karlsruhe, Heft 54, Karlsruhe 2005

[Krass 1971]

Krass, K.:
Kriechuntersuchungen an zylindrischen Asphaltprobekörpern
Veröffentlichungen des Institutes für Straßenbau und Eisenbahnwesen der Universität Karlsruhe, Heft 5, Karlsruhe 1971

[Leutner 2003]
Leutner, R.; Renken, P.; Büchler, S.; Lobach, T.:
Schlussbericht zum FA Überprüfung der Eignung des dynamischen Stempelindringversuches zur Beurteilung der Verformungseigenschaften von Asphalt und Schaffung eines Bewertungshintergrundes
AiF Forschungsvorhaben Nr. 12522N, Braunschweig, Mai 2003

[Leutner 2006]
Leutner, R.; Lorenzl, H.; Schmoeckel, K.; u. v. m.:
Stoffmodelle zur Voraussage des Verformungswiderstandes und Ermüdungsverhaltens von Asphaltbefestigungen
Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft S 45, 2006

[Oeser 2004]
Oeser, M.:
Numerische Simulation des nichtlinearen Verhaltens flexibler mehrschichtiger Verkehrswegebefestigungen
Dissertation, TU Dresden, Veröffentlichungen des Lehrstuhls für Statik, Heft 7
Dresden 2004

[Renken 1998]
Renken, P.: Schlussbericht zum FA Optimierung und Qualitätssicherung offenporiger Asphaltdeckschichten
BMV Forschungsbericht FE-Nr. 07.174/1996/CR, 1998

[Renken 2005]
Renken, P.; Büchler, S.:
Optimierung des Triaxialversuchs zur Bewertung des Verformungswiderstandes von Asphalt
Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen Heft S 39; 2005

[Steinauer 2002]
Steinauer B.; Scharnigg K.:
Schlussbericht zum FA Vergleich der Prüfverfahren zur Ansprache der Verformungseigenschaften von Asphalt – Grundsätzliches und Beitrag zur Europäischen Normung
FE 07.200/2002/CGB

[v. d. Decken 1997]
v. d. Decken, S.:
Triaxialversuch mit schwellendem Axial- und Radialdruck zur Untersuchung des Verformungswiderstandes von Asphalten
Schriftenreihe des Instituts für Straßenwesen, Heft 15, 1997

[Wellner, Leutner 2007]

Wellner, F.; Leutner, R.; Lorenzl, H.; Oeser, M.; Schindler, K.; et al.:

Schlussbericht zum FA Nachhaltiger Straßenbau – Bemessungsmodell zur Förderung der Innovations- und Wettbewerbsfähigkeit kleinerer und mittlerer Straßenbauunternehmen

BMVBW Forschungsvorhaben Nr. 19 W 3055A; Verbundprojekt Dresden Braunschweig 2007

[Witzcak 2002]

Witzcak, M.W.:

Simple Performance Test for Superpave Mix Design

National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), Report 465

Transportation Research Board (TRB), National Council

Washington DC, 2002, USA

7.3 SOFTWARE

REFEM 3D [Oeser 2004]

ABKÜRZUNGEN UND FORMELZEICHEN

FORMELZEICHEN

a, b, c, k		Anpassungskoeffizient bzw. –exponent zur Berechnung der Impulskriechkurve (DSV, DSEV, Triax)
A_1, A_2, A_3	[-]	Anpassungskoeffizienten
α_T	[-]	Verschiebungsfaktor (Temperatur-Frequenz-Äquivalenz)
b	[mm]	Breite
B	[M.-%]	Bindemittelgehalt
d	[mm]	Durchmesser
E	[MPa]	Elastizitätsmodul
E_S	[MPa]	Steifemodul
E_{el}, E_r, E'	[MPa]	elastischer Anteil, Realanteil des Elastizitätsmoduls
E_{vis}, E_i, E''	[MPa]	viskoser Anteil, Imaginäranteil des Elastizitätsmoduls
E^*	[MPa]	komplexer E-Modul
$ E $	[MPa]	absoluter E-Modul
E_∞	[MPa]	Glasmodul
ε	[‰]	Dehnung
ε_{ax}	[‰]	axiale Dehnung
ε_{rad}	[‰]	radiale Dehnung
$\hat{\varepsilon}$	[‰]	Dehnungsamplitude
$\dot{\varepsilon}$	[‰/n]	Dehnungsrate
f	[Hz]	Frequenz
f_{kor}	[Hz]	korrigierte Frequenz
Φ	[°], [rad]	Phasenwinkel
h	[mm]	Höhe
H_{bit}	[Vol.-%]	Hohlraumgehalt
λ	[MPa s]	Viskosität
L	[mm]	Länge
μ	[-]	Querdehnzahl
n	[-]	Anzahl der Lastwechsel
ρ_A	[g/cm ³]	Raumdicke des Asphalt-Mischgutes

ρ_B	[g/cm ³]	Dichte des Bitumens
$\rho_{R, \text{ bit}}$	[g/cm ³]	Rohdichte des Mischgutes
$\rho_{R, M}$	[g/cm ³]	Rohdichte des Gesteins
R	[-]	Reduktionsfaktor
σ	[MPa]	Spannung
σ_B	[MPa]	axiale Spannung (Blockimpuls)
σ_V	[MPa]	axiale Spannung (Sinusimpuls)
σ_1, σ_{ax}	[MPa]	axiale Spannung (z-Achse)
$\sigma_2, \sigma_{rad}, \sigma_c$	[MPa]	radiale Spannung (x-Achse)
$\sigma_3, \sigma_{rad}, \sigma_c$	[MPa]	radiale Spannung (y-Achse)
$\hat{\sigma}$	[MPa]	Spannungsamplitude
σ_o	[MPa]	Oberspannung
σ_u	[MPa]	Unterspannung
σ_{Dev}	[MPa]	Deviatorischer Spannungsanteil
$s_{appr.}$	[‰/n]	Steigung der letzten 8.000 Lastwechsel der approximierten Dehnungen
$s_{orig.}$	[‰/n]	Steigung der letzten 8.000 Lastwechsel der im Versuch ermittelten Dehnungen
T	[°C]	Temperatur
T_R	[°C]	Bezugstemperatur
t	[s]	Zeit
V_a	[Vol.-%]	Hohlraumvolumen
V_b	[Vol.-%]	Bindemittelvolumen
V_g	[Vol.-%]	Gesteinsvolumen

ABKÜRZUNGEN

AB	Asphaltbeton
ABi	Asphaltbinder
ATS	Asphalttragschicht
DSEV	Dynamischer Stempeleindringversuch
DSR	Dynamisches Scher-Rheometer
DSV	Einaxialer Druckschwellversuch
FE	Finite Elemente
FEM	Finite-Elemente-Methode
h/d Verhältnis	Höhe zu Durchmesser Verhältnis
LW	Lastwechsel
OPA	Offenporiger Asphalt
PmB	Polymermodifiziertes Bitumen
RStO	Richtlinie für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen
SMA	Splittmastixasphalt
TP	Technische Prüfvorschrift
Triax	Triaxialversuch
ZTV	Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 3-1: Ermittlung einer Masterkurve [Hürtgen 2000]	10
Abb. 3-2: Phasenverschiebung [FGSV 2006].....	11
Abb. 3-3: Ergebnisse eines DSR-Versuches mit programmiert gesteigerter Frequenz [Hagner 2003].....	11
Abb. 3-4: Schematische Darstellung der Aufteilung des komplexen Elastizitäts- moduls in einen realen und einen imaginären Anteil [FGSV 2006].....	12
Abb. 3-5: Impulskriechkurve, ermittelt mit dem einaxialen Druckschwellversuch....	14
Abb. 3-6: Prototyp der Triaxialprüfmaschine [Arand, v. d. Decken 1996].....	17
Abb. 3-7: Dehnungskurven, ermittelt mit Triaxialversuchen bei unterschiedlichem Stützdruck [Renken 2005].....	20
Abb. 3-8: Steigung der axialen Dehnung am Versuchsende aufgetragen über den aufgebrachten Stützdruck [Renken 2005].....	21
Abb. 3-9: Grafische Ermittlung der maximalen Krümmung der Funktion [Renken 2005]	21
Abb. 3-10: Phasenverschiebung [Leutner 2006]	23
Abb. 3-11: Einaxialer Druckschwellversuch nach TP A-StB – Versuchseinrichtung	26
Abb. 3-12: Einaxialer Druckschwellversuch nach TP A-StB – Belastung [FGSV 1999]	27
Abb. 3-13: Impulskriechkurve ermittelt mit dem einaxialen Druckschwell- versuch [FGSV 1999]	27
Abb. 3-14: Messsystem am Probekörper [Clyne 2003]	29
Abb. 3-15: Dynamischer Stempeleindringversuch [Arand, v. d. Decken 1996]	31
Abb. 3-16: Typische Dehnungsverläufe, ermittelt mit dynamischen Stempeleindringversuchen [Leutner 2006]	32
Abb. 3-17: Spurbildungsversuch	34
Abb. 4-1: links: Ergebnisse der Triaxialversuche – Einfluss der Endflächenreibung, rechts: ohne Vorbehandlung	40
Abb. 4-2: Spannungen im Lasteinleitungsbereich bei verschiedenen Endflächenbeschichtungen (Skizze).....	40
Abb. 4-3: Berechnete Spannungen und Dehnungen mit REFEM 3D	41
Abb. 4-4: Einfluss des h/d-Verhältnisses beim dynamischen Triaxialversuch.....	42

Abb. 4-5: Einfluss des h/d-Verhältnisses beim einaxialen Druckschwellversuch	42
Abb. 4-6: Einfluss der Probekörperhöhe	43
Abb. 4-7: Ergebnisse der Triaxialversuche - Anisotropie (ABi 0/16 S)	44
Abb. 4-8: Ergebnisse der Triaxialversuche - Anisotropie (SMA I)	45
Abb. 4-9: Ergebnisse der Triaxialversuche - Anisotropie (SMA I), Einfluss Hohlraumgehalt.....	46
Abb. 4-10: Verteilung der Hohlraumgehalte in der Asphaltplatte.....	47
Abb. 4-11: Bohrkernentnahme aus der Asphaltplatte.....	48
Abb. 4-12: Ergebnisse der Durchstrahlung des Asphaltprobekörpers.....	48
Abb. 4-13: links & Mitte: DSV mit Messsystem am Probekörper, rechts: DSV mit Messsystem an der Traverse.....	50
Abb. 4-14: Ergebnisse der Untersuchungen an 120 mm hohen Probekörpern – bleibende axiale Dehnung.....	50
Abb. 4-15: Ergebnisse der Untersuchungen an 120 mm hohen Probekörpern – elastische axiale Dehnung	51
Abb. 4-16: Optimierung der Anbringung des Messsystems am Probekörper.....	52
Abb. 4-17: Überprüfung der Veränderung der Neigung angeklebter Winkel	52
Abb. 4-18: Optimierung des Wegmesssystems am Probekörper.....	53
Abb. 4-19: Weitere Lösungsmöglichkeiten für ein Messsystem am Probekörper [Wellner, Leutner 2007; Clyne 2003].....	54
Abb. 4-20: Grenzbereiche der Reduktionsfaktoren bei 10 Hz – PmB 45A, PmB H, 50/70	56
Abb. 4-21: Absolute Elastizitätsmoduln nach Francken und Verstraeten.....	57
Abb. 4-22: Absolute Elastizitätsmoduln nach Francken und Verstraeten bei unterschiedlichen Frequenzen und Temperaturen - AB 0/11S	58
Abb. 4-23: Masterkurve – AB 0/11S.....	58
Abb. 4-24: Auswertegrößen – einaxialer Druckschwellversuch.....	59
Abb. 4-25: Vergleich der elastischen axialen Dehnungen und absoluten Elastizitätsmoduln - DSV (AB)	60
Abb. 4-26: Vergleich der absoluten Elastizitätsmoduln verschiedener Asphaltvarianten - DSV	61
Abb. 4-27: Absolute Elastizitätsmoduln in Abhängigkeit von der Frequenz - DSV (AB, $\sigma_1=0,3$ MPa).....	62

Abb. 4-28: Phasenwinkel, ermittelt bei unterschiedlichen Beanspruchungen – DSV (ABi)	63
Abb. 4-29: Vergleich der Phasenwinkel verschiedener Asphaltvarianten - DSV	63
Abb. 4-30: Erklärungsansatz unter Berücksichtigung der Rheologie	64
Abb. 4-31: Verschiedene Verläufe von Phasenwinkeln und Phasen aufgetragen über die Lasteinwirkungsdauer	65
Abb. 4-32: Phase, gemessen bei unterschiedlichen Beanspruchungen – DSV (ABi)	66
Abb. 4-33: Vergleich der Phasen verschiedener Asphaltvarianten - DSV	67
Abb. 4-34: Spannungsanteile	68
Abb. 4-35: Verformungen bei unterschiedlichen Spannungszuständen, vereinfacht 2-D	69
Abb. 4-36: Spannungszustand für die Bedingung $\varepsilon_{\text{rad}}=0$, vereinfacht 2-D	70
Abb. 4-37: Spannungszustände unter Berücksichtigung von unterschiedlichen Querdehnzahlen	70
Abb. 4-38: Vergleich der absoluten Elastizitätsmoduln – Triax (AB, 30 °C und 50 °C)	73
Abb. 4-39: Vergleich der absoluten Elastizitätsmoduln verschiedener Asphaltvarianten - Triax	75
Abb. 4-40: Querdehnzahl – DSV (AB)	76
Abb. 4-41: Temperaturabhängigkeit der Querdehnzahl	77
Abb. 4-42: Vergleich der elastischen axialen und radialen Dehnungen, Querdehnzahlen – Triax (AB, 30 °C)	78
Abb. 4-43: Vergleich der elastischen axialen und radialen Dehnungen, Querdehnzahlen – Triax (AB, 50 °C)	79
Abb. 4-44: Querdehnzahlen verschiedener Asphaltvarianten - Triax	80
Abb. 4-45: Vergleich der Phasenwinkel und der Phasen - Triax (AB)	81
Abb. 4-46: Vergleich Phasen – DSV und Triax (AB, 50 °C, 10 Hz)	82
Abb. 4-47: Vergleich der Phasen der verschiedenen Asphaltvarianten – Triax (10 Hz)	83
Abb. 4-48: Auswertegrößen – DSEV	84
Abb. 4-49: Steifemodul – DSEV (ABi)	84
Abb. 4-50: Steifemodul – DSEV (ABi, 40 °C)	85
Abb. 4-51: Vergleich der Steifemoduln verschiedener Asphaltvarianten – DSEV	85

Abb. 4-52: Steifemoduln in Abhängigkeit von der Last – DSEV (10 Hz)	87
Abb. 4-53: Vergleich der Phasenwinkel und Phasen - DSEV (ABi).....	88
Abb. 4-54: Relaxationszeiten verschiedener Asphaltvarianten ermittelt bei -10 °C [Wellner, Leutner 2007]	89
Abb. 4-55: Vergleich der Phasen unterschiedlicher Asphaltvarianten - DSEV	90
Abb. 4-56: Elastischer und viskoser Anteil des Verformungsmoduls	91
Abb. 4-57: Spannungs-Dehnungs-Beziehung - Feder und Voigt-Kelvin-Element	92
Abb. 4-58: Theorie zur Unterscheidung von elastischen und viskoelastischen Verformungsanteilen.....	93
Abb. 4-59: Bleibende Dehnung - Hystereseschleifen.....	93
Abb. 4-60: Einfluss der Frequenz auf den Verlauf der Hystereseschleife	94
Abb. 4-61: Berechnete Flächen A_V in den Hystereseschleifen.....	95
Abb. 4-62: Hystereseschleifen bei unterschiedlichen Frequenzen, ermittelt mit Versuchen unter Druckschwellbelastung	95
Abb. 4-63: Hystereseschleifen Druckschwellversuch - Wechselversuch	96
Abb. 4-64: Unterteilung der gemessenen Verformungskurve in eine elastische und viskoelastische Verformungskurve.....	96
Abb. 4-65: Dehnungen rheologischer Elemente.....	100
Abb. 4-66: Subtraktion des Dehnungszuwachses von der Dehnungskurve.....	100
Abb. 4-67: Iterative Berechnung ohne Vorgabe und mit Vorgabe eines Startwertes	102
Abb. 4-68: Iterative Berechnung der elastischen und viskoelastischen Anteile - DSV	103
Abb. 4-69: Vergleich der bleibenden axialen Dehnungen nach 16.000 LW sowie der Dehnungsraten - DSV (AB, 30 °C)	106
Abb. 4-70: Vergleich der bleibenden axialen Dehnungen nach 16.000 LW sowie der Dehnungsraten - DSV (AB, 40 °C)	106
Abb. 4-71: Vergleich der bleibenden axialen Dehnungen nach 16.000 LW sowie der Dehnungsraten – DSV (AB, 50 °C).....	107
Abb. 4-72: Vergleich der bleibenden axialen Dehnungen nach 16.000 LW verschiedener Asphaltvarianten – DSV ($\sigma_1=0,3$ MPa).....	107
Abb. 4-73: Vergleich der bleibenden axialen Dehnungen nach 16.000 LW verschiedener Asphaltvarianten – DSV (10 Hz)	108
Abb. 4-74: Vergleich der bleibenden axialen Dehnungen nach 16.000 und 100.000 LW sowie der Dehnungsraten - Triax (AB, 30 °C)	109

Abb. 4-75: Vergleich der bleibenden axialen Dehnungen nach 16.000 und 100.000 LW sowie der Dehnungsraten – Triax (AB, 50 °C).....	109
Abb. 4-76: Vergleich der bleibenden radialen und axialen Dehnungen nach 100.000 LW – Triax (AB, 30 °C und 50 °C)	110
Abb. 4-77: Vergleich der bleibenden radialen und axialen Dehnungen nach 100.000 LW – Triax (ABi, 30 °C und 50 °C).....	110
Abb. 4-78: Vergleich der bleibenden axialen Dehnungen nach 16.000 und 100.000 LW sowie der Dehnungsraten - Triax (ABi, 30 °C).....	111
Abb. 4-79: Vergleich der bleibenden axialen Dehnungen nach 16.000 und 100.000 LW sowie der Dehnungsraten - Triax (ABi, 50 °C).....	111
Abb. 4-80: Vergleich der bleibenden axialen Dehnungen der verschiedenen Asphaltvarianten nach 100.000 LW - Triax (10 Hz)	112
Abb. 4-81: Vergleich der bleibenden radialen Dehnungen der verschiedenen Asphaltvarianten nach 100.000 LW - Triax (10 Hz)	113
Abb. 4-82: Vergleich der bleibenden axialen Dehnungen nach 16.000 LW bzw. 100.000 LW sowie der Dehnungsraten – DSEV (AB, 30 °C).....	114
Abb. 4-83: Vergleich der bleibenden axialen Dehnungen nach 16.000 LW bzw. 100.000 LW sowie der Dehnungsraten – DSEV (AB, 40 °C).....	114
Abb. 4-84: Vergleich der bleibenden axialen Dehnungen nach 16.000 LW bzw. 100.000 LW sowie der Dehnungsraten – DSEV (AB, 50 °C).....	115
Abb. 4-85: Vergleich der bleibenden axialen Dehnungen verschiedener Asphaltvarianten nach 16.000 LW – DSEV (10 Hz).....	115
Abb. 4-86: Vergleich der bleibenden axialen Dehnungen verschiedener Asphaltvarianten nach 16.000 LW – DSEV ($\sigma_1=0,3$ MPa)	116
Abb. 4-87: Ergebnisse der Spurbildungsversuche	117
Abb. 4-88: Steigung der letzten 8.000 Lastwechsel der Dehnungsverläufe (approximiert, original) - DSV (AB)	119
Abb. 4-89: Häufigkeitsverteilung der Bestimmtheitsmaße der verwendeten Approximationsgleichungen – DSV (AB)	120
Abb. 4-90: Steigung der letzten 8.000 Lastwechsel der Dehnungsverläufe (approximiert, original) - Triax (AB).....	121
Abb. 4-91: Häufigkeitsverteilung der Bestimmtheitsmaße der verwendeten Approximationsgleichungen – Triax (AB).....	121
Abb. 4-92: Steigung der letzten 8.000 Lastwechsel der Dehnungsverläufe (approximiert, original) - DSEV (AB)	122
Abb. 4-93: Häufigkeitsverteilung der Bestimmtheitsmaße der verwendeten Approximationsgleichungen – DSEV (AB).....	123

Abb. 4-94: Abhängigkeiten des Faktors a und des Exponenten k der Approximationsgleichung 4-17 von den jeweiligen Prüfbedingungen – DSV (AB)	124
Abb. 4-95: Abhängigkeiten des Faktors b und des Exponenten c der Approximationsgleichung 4-17 von den jeweiligen Prüfbedingungen – DSV (AB)	125
Abb. 4-96: Bestimmtheitsmaße der Approximationen ohne und mit Vorgabe des Exponenten k – DSV (AB)	126
Abb. 4-97: Abhängigkeiten des Faktors a und des Exponenten k der Approximationsgleichung 4-17 von den jeweiligen Prüfbedingungen – DSV, Triax, DSEV (AB)	127
Abb. 4-98: Abhängigkeiten des Faktors a, ermittelt mit dem Druckschwell- und Triaxialversuch von der Spannung (AB)	128
Abb. 5-1: Vergleich der absoluten Elastizitätsmoduln/ Steifemoduln, ermittelt mit DSV, Triax, DSEV sowie berechnet nach Francken und Verstraeten	130
Abb. 5-2: Vergleich der Prüfverfahren - Phase	132
Abb. 5-3: Phase, ermittelt mit dem DSV bei unterschiedlicher axialer Spannung	132
Abb. 5-4: Vergleich der Prüfverfahren – bleibende axiale Dehnung nach 16.000 Lastwechseln	134

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 3-1: Gegenüberstellung der Prüfbedingungen des Triaxialversuches	18
Tabelle 3-2: Versuchsprogramm – dynamischer Triaxialversuch (Triax).....	26
Tabelle 3-3: Versuchsprogramm – einaxialer Druckschwellversuch (DSV).....	30
Tabelle 3-4: Versuchsprogramm – dynamischer Stempeleindringversuch (DSEV)	33
Tabelle 3-5: Untersuchte Asphaltvarianten	35
Tabelle 3-6: Vorgaben der Verdichtung mit dem Walzsektor-Verdichter.....	37
Tabelle 4-1: Raumdichte und Hohlraumgehalt der Asphaltbohrkernscheiben.....	49
Tabelle 4-2: Berechnete Volumenanteile und Glasmoduln der untersuchten Asphaltvarianten.....	56
Tabelle 4-3: Spannungen und Dehnungen beim Triaxialversuch	72
Tabelle 4-4: Einfluss der einzelnen Summanden der Gleichung zur Beschreibung des Voigt-Kelvin-Modells auf die Gesamtdehnung	88
Tabelle 4-5: Berechnungsschritte bei der iterativen Berechnung	102

Anhang

Anhang A:	Kennwerte der Zusammensetzung.....	155
Anhang B:	Druckschwellversuche (Versuchsprogramm, Eigenschaften der Probekörper, Versuchsergebnisse).....	161
Anhang C:	Approximation der Dehnungsverläufe (akkumulierte axiale Dehnung) ermittelt mit dem Druckschwellversuch.....	168
Anhang D:	Dynamischer Stempeleindringversuch (Versuchsprogramm, Eigenschaften der Probekörper, Versuchsergebnisse).....	174
Anhang E:	Approximation der Dehnungsverläufe (akkumulierte axiale Dehnung) ermittelt mit dem dyn. Stempeleindringversuch	187
Anhang F:	Triaxialversuch (Versuchsprogramm, Eigenschaften der Probekörper, Versuchsergebnisse).....	199
Anhang G:	Approximation der Dehnungsverläufe (akkumulierte axiale und radiale Dehnung) ermittelt mit dem Triaxialversuch.....	210
Anhang H:	Absolute Elastizitätsmoduln nach Francken und Verstraeten	221

Tabelle A1: Mischgutzusammensetzung SMA 0/11S (SMA I)

SMA 0/11S (SMA I)		Angaben aus der Eignungsprüfung	IST Kontrollprüfung	SOLL (ZTVAsphalt-StB 01)
ZUSAMMENSETZUNG				
Bindemittelgehalt	M.-%	6,5	6,3 6,2 6,2	$\geq 6,5$ (6,0 – 7,0)
Füller	M.-%	9,0	9,6 8,9 9,1	6,0 – 12,0
Sand	M.-%	16,0	17,4 15,8 18,7	8,0 – 24,0
Splitt	M.-%	75,0	73,0 75,3 72,2	67,0 – 83,0
Zusätze	M.-%	0,3	vorhanden	0,3 – 1,5
BS- NS- Verhältnis	-	1:0	1:0	1:0
Kornanteil > 5,0 mm	M.-%	63,6	63,5 63,8 63,0	50,6 – 76,3
Größtkornant. > 8,0 mm	M.-%	42,9	41,9 37,8 39,9	34,3 – 51,5
Überkornant. > 11,2 mm	M.-%	3,2	5,3 2,3 3,6	≤ 10
EIGENSCHAFTEN D. EXTR. BINDEMITTEL				
Art des Bitumens		PmB 45 A Caribit	PmB 45 A	PmB 45 A
Erweichungspkt. RuK	°C	59,0	66,2 62,4 67,0	55,0 – 63,0 (71,0)
Elastische Rückstellung	%	–	56 69 59	–
EIGENSCHAFTEN DER GESTEINSKÖRNUNGEN				
Art der Gesteinskörnungen				
Kornklasse 8/11		Gabbro-Edelsplitt	Gabbro	Edelsplitt
Kornklasse 5/8				
Kornklasse 2/5				
Kornklasse 0/2		Gabbro-Edelbrechs.		Edelbrechsand
Füller		Gabbro-Gest.-mehl		Gesteinsmehl
EIGENSCHAFTEN DER ZUSÄTZE				
Art der Zusätze		Cellulosefaser	Faserstoffe	Faserstoffe
EIGENSCHAFTEN DER PROBEKÖRPER				
Raumdichte	g/cm³	2,476	2,529 2,515 2,536	–
Rohdichte	g/cm³	2,563	2,603 2,611 2,610	–
Hohlraumgehalt	Vol.-%	3,4	2,8 3,7 2,8	1,5 – 5,5
Hohlraumfüllungsgrad	%	82,2	84,7 80,4 84,6	–

Tabelle A2: Mischgutzusammensetzung SMA 0/11S (SMA II)

SMA 0/11S (SMA II)		Angaben aus der Eignungsprüfung	IST Kontrollprüfung	SOLL (ZTV Asphalt-StB 01)
ZUSAMMENSETZUNG				
Bindemittelgehalt	M.-%	6,8	6,8	$\geq 6,8$ (6,3 – 7,3)
Füller	M.-%	10,9	11,0	7,9 – 13,9
Sand	M.-%	12,9	13,6	4,9 – 20,9
Splitt	M.-%	76,2	75,4	68,2 – 84,2
Zusätze	M.-%	0,45	vorhanden	0,3 – 1,5
BS- NS- Verhältnis	-	1:0	1:0	1:0
Kornanteil > 5,0 mm	M.-%	65,9	64,5	52,7 – 79,1
Größtkornant. > 8,0 mm	M.-%	44,8	43,7	35,8 – 53,8
Überkornant. > 11,2 mm	M.-%	3,0	3,2	≤ 10
EIGENSCHAFTEN D. EXTR. BINDEMITTEL				
Art des Bitumens		PmB 45 A (Olexobit)	PmB 45 A	PmB 45 A
Erweichungspkt. RuK	°C	62,0	67,2	55,0 – 63,0 (71,0)
Elastische Rückstellung	%	68,0	56,0	–
EIGENSCHAFTEN DER GESTEINSKÖRnungen				
Art der Gesteinskörnungen				
Kornklasse 8/11		Kiesedelsplitt	Moräne	Edelsplitt
Kornklasse 5/8				
Kornklasse 2/5				
Kornklasse 0/2		Kieselbrechsand		Edelbrechsand
Füller		Kalksteinmehl		Gesteinsmehl
EIGENSCHAFTEN DER ZUSÄTZE				
Art der Zusätze		Viatop 66	Faserstoffe	Faserstoffe
EIGENSCHAFTEN DER PROBEKÖRPER				
Raumdicke	g/cm ³	2,351	2,333	–
Rohdicke	g/cm ³	2,432	2,430	–
Hohlraumgehalt	Vol.-%	3,2	4,0	1,5 – 5,5
Hohlraumfüllungsgrad	%	82,1	79,5	–

Tabelle A3: Mischgutzusammensetzung OPA 0/8

OPA 0/8		Angaben aus der Eignungsprüfung	IST Kontrollprüfung	SOLL (Merkblatt für OPA)
ZUSAMMENSETZUNG				
Bindemittelgehalt	M.-%	6,2	6,6	5,7 – 6,7
Füller	M.-%	4,6	3,9	1,6 – 7,6
Sand	M.-%	0,6	2,2	–
Splitt	M.-%	94,8	93,9	86,8 – 100
Bindemittelträger	M.-%	0,7	vorhanden	≥ 0,5
BS- NS- Verhältnis	-	–	–	–
Kornanteil > 5,0 mm	M.-%	92,6	95,1	74,1 – 100
Größtkornant. > 8,0 mm	M.-%	7,3	4,9	≤ 10
Überkornant. > 11,2 mm	M.-%	0	0	–
EIGENSCHAFTEN D. EXTR. BINDEMITTEL				
Art des Bitumens		PmB 40-100/65 H Olexobit	PmB 40-100/65 H	PmB 40-100/65 H
Erweichungspkt. RuK	°C	87,0	71,8	≥ 65
Elastische Rückstellung	%	86,0	–	–
EIGENSCHAFTEN DER GESTEINSKÖRNUNGEN				
Art der Gesteinskörnungen				
Kornklasse 5/8		Kies gebrochen	Kiessplitt	Edelsplitt
Füller		Kalkstein		Gesteinsmehl
EIGENSCHAFTEN DER ZUSÄTZE				
Art der Zusätze/ Bindemittelträger		Viatop 66	Viatop	Faserstoffe
EIGENSCHAFTEN DER PROBEKÖRPER				
Raumdichte	g/cm³	1,826	1,803	–
Rohdichte	g/cm³	2,407	2,414	–
Hohlraumgehalt	Vol.-%	24,1	25,3	21,1 – 27,1
Hohlraumfüllungsgrad	%	31,6	31,5	–

Tabelle A4: Mischgutzusammensetzung AB 0/11S

AB 0/11S		Angaben aus der Eignungsprüfung	IST Kontrollprüfung	SOLL (ZTV Asphalt-StB 01)
ZUSAMMENSETZUNG				
Bindemittelgehalt	M.-%	6,2	6,0 5,9	5,7 – 6,5
Füller	M.-%	9,4	10,7 10,6	6,4 – 12,4
Sand	M.-%	37,4	33,5 35,0	29,4 – 45,4
Splitt	M.-%	53,2	55,8 54,4	45,2 – 61,2
Zusätze	M.-%	–	–	–
BS- NS- Verhältnis	-	1:0	1:0	≥ 1:1
Größtkornant. > 8,0 mm	M.-%	19,9	22,9 20,9	15,9 – 23,9
Überkornant. > 11,2 mm	M.-%	1,3	0,6 1,2	≤ 10
EIGENSCHAFTEN D. EXTR. BINDEMITTEL				
Art des Bitumens		50/70 Esso	50/70	50/70
Erweichungspkt. RuK	°C	52,0	54,2	48 – 54 (63)
Elastische Rückstellung	%	–	–	–
EIGENSCHAFTEN DER GESTEINSKÖRNUNGEN				
Art der Gesteinskörnungen				
Kornklasse 8/11		Kiesel Splitt	Kiessplitt	Edelsplitt
Kornklasse 5/8				
Kornklasse 2/5				
Kornklasse 0/2		Kiesel Brechsand		Edel Brechsand
Füller		ohne Kalksteinmehlzugabe		Gesteinsmehl
EIGENSCHAFTEN DER ZUSÄTZE				
Art der Zusätze		–	–	–
EIGENSCHAFTEN DER PROBEKÖRPER				
Raumdicke	g/cm³	2,374	2,406 2,395	–
Rohdicke	g/cm³	2,448	2,476 2,476	–
Hohlraumgehalt	Vol.- %	3,0	2,8 3,3	1,5 – 6,5
Hohlraumfüllungsgrad	%	82,6	83,4 80,7	–

Tabelle A5: Mischgutzusammensetzung ABi 0/16S

ABi 0/16S		Angaben aus der Eignungsprüfung	IST Kontrollprüfung	SOLL (ZTV Asphalt-StB 01)
ZUSAMMENSETZUNG				
Bindemittelgehalt	M.-%	4,5	4,7	4,0 – 5,0
Füller	M.-%	7,1	7,2	4,1 – 10,1
Sand	M.-%	20,9	21,9	12,9 – 28,9
Splitt	M.-%	72,0	70,9	64,0 – 80,0
Zusätze	M.-%	–	–	–
BS- NS- Verhältnis	-	1:0	1:0	1:0
Größtkornant. > 11,2 mm	M.-%	30,0	29,6	24,0 – 36,0
Überkornant. > 16,0 mm	M.-%	0,7	1,1	≤ 10
EIGENSCHAFTEN D. EXTR. BINDEMITTEL				
Art des Bitumens		PmB 45 A Olexobit	PmB 45 A	PmB 45 A
Erweichungspkt. RuK	°C	60,0	64,4	55,0 – 63 (≤ 71)
Elastische Rückstellung	%	70	47	–
EIGENSCHAFTEN DER GESTEINSKÖRNUNGEN-				
Art der Gesteinskörnungen				
Kornklasse 11/16		Kiesel Splitt	Moräne	Edel Splitt
Kornklasse 8/11				
Kornklasse 5/8				
Kornklasse 2/5				
Kornklasse 0/2		Kiesel Brechsand		Edel Brechsand
Füller		Kalksteinmehl		Gesteinsmehl
EIGENSCHAFTEN DER ZUSÄTZE				
Art der Zusätze		–	–	–
EIGENSCHAFTEN DER PROBEKÖRPER				
Raumdicke	g/cm³	2,365	2,417	–
Rohdicke	g/cm³	2,514	2,514	–
Hohlraumgehalt	Vol.-%	5,9	3,9	2,0 – 9,0
Hohlraumfüllungsgrad	%	63,8	–	–

Tabelle A6: Mischgutzusammensetzung ATS 0/32 CS (ohne Granulatzugabe)

ATS 0/32 CS		Angaben aus der Eignungsprüfung	IST Kontrollprüfung	SOLL (ZTV T-StB 95/02)
ZUSAMMENSETZUNG				
Bindemittelgehalt	M.-%	4,2	3,9 4,8	3,6 – 4,8
Füller	M.-%	8,0	7,5 8,9	5,0 – 15,0
Sand	M.-%	24,5	20,8 27,6	–
Splitt	M.-%	67,5	71,7 63,5	58,5 – 76,5
Zusätze	M.-%	–	–	–
BS- NS- Verhältnis	-	–	–	≥ 1:1
Kornanteil > 16,0 mm	M.-%	26,0	35,9 16,5	≥ 15
Größtkornant. > 22,4 mm	M.-%	10,9	21,9 9,5	≥ 10
Überkornant. > 31,5 mm	M.-%	–	3,3 0,0	≤ 10
EIGENSCHAFTEN D. EXTR. BINDEMITTEL				
Art des Bitumens		50/70	50/70	50/70
Erweichungspkt. RuK	°C	52,0	56,4 56,4	48 – 54 (63)
Elastische Rückstellung	%	–	–	–
EIGENSCHAFTEN DER GESTEINSKÖRNUNGEN				
Art der Gesteinskörnungen				
Kornklasse 16/32		Muschelkalksplitt		
Kornklasse 11/16				
Kornklasse 8/11				
Kornklasse 5/8				
Kornklasse 2/5				
Kornklasse 0/2		Muschelkalkbrechsand		
Füller				
EIGENSCHAFTEN DER ZUSÄTZE				
Art der Zusätze		–	–	–
EIGENSCHAFTEN DER PROBEKÖRPER				
Raumdicke	g/cm³	2,391	2,398 2,421	–
Rohdicke	g/cm³	2,520	2,553 2,523	–
Hohlraumgehalt	Vol.- %	5,1	6,1 4,0	3,0 – 12,0
Hohlraumfüllungsgrad	%	65,7	59,9 73,9	–
Stabilität n. Marshall	kN	10,9	11,1 11,4	≥ 8,0
Fließwert	mm	3,6	2,8 3,6	1,5 – 5,0

Tabelle B1: Versuchsprogramm, Eigenschaften der Probekörper, Versuchsergebnisse – DSV (AB 0/11S)

Versuchsprogramm				Eigenschaften der Probekörper				Versuchsergebnisse					
T	f	σ_{ax}	Bez. PK	ρ_A	H _{bit}	k		ε_{ax} nach 16.000 LW	$\dot{\varepsilon}_{ax}$ nach 16.000 LW	$\hat{\varepsilon}_{ax}$	E	Φ	Φ
[°C]	[Hz]	[MPa]		[g/cm³]	[Vol.-%]	[%]		[%]	[%/LW]	[%]	[MPa]	[°]	[ms]
30	10	0,15	AB1652	2,420	2,4	100,8		6,067	0,0000932	0,2173	690,27	40,57	11,271
			AB2132	2,414	2,7	100,6		7,260	0,0001058	0,1489	898,35	40,19	11,16
			AB1682	2,413	2,7	100,5		10,979	0,0001427	0,2046	1466,06	34,70	9,638
		0,3	AB1611	2,404	3,1	100,1		15,163	0,0002531	0,1648	1819,84	34,08	9,468
			AB1653	2,404	3,1	100,1		18,108	0,0002468	0,4631	971,61	33,06	9,183
			AB1612	2,425	2,2	101,0		15,561	0,0002123	0,2257	1993,95	33,50	9,305
	5	0,15	AB1663	2,410	2,8	100,4		7,223	0,0001105	0,1921	780,85	28,68	15,965
			AB1662	2,419	2,5	100,7		13,122	0,0001423	0,2209	1358,17	26,11	14,503
			AB2011	2,396	3,4	99,8		14,931	0,0001690	0,2429	1172,83	24,27	13,485
		0,45	AB2133	2,405	3,0	100,2		22,933	0,0002276	0,3363	1281,59	25,28	14,046
			AB1511	2,421	2,4	100,9		34,518	0,0002320	0,4520	934,52	24,50	14,425
			AB1623	2,396	3,4	99,8		11,037	0,0001566	0,1962	764,54	24,87	20,769
40	3,33	0,15	AB1691	2,398	3,3	99,9		16,703	0,0001545	0,2426	1236,41	24,90	20,751
			AB2013	2,398	3,3	99,9		18,653	0,0001640	0,2432	1110,31	22,64	18,864
			AB1703	2,401	3,2	100,0		22,285	0,0002170	0,4569	984,96	20,43	17,492
		0,3	AB52	2,422	2,4	100,9		10,851	0,0000845	0,1510	993,12	45,47	12,780
			AB51	2,405	3,0	100,2		22,264	0,0001870	0,3545	846,29	42,05	11,681
			AB1631	2,401	3,2	100,0		19,410	0,0001250	0,2961	1013,06	42,57	11,824
	10	0,45	AB53	2,405	3,0	100,2		26,790	0,0002510	0,5197	865,81	40,68	11,300
			AB1681	2,399	3,3	99,9		32,940	0,0002370	0,4649	968,02	41,89	11,637
			AB1632	2,424	2,3	101,0		14,679	0,0000870	0,1819	824,61	37,92	21,066
		0,15	AB1643	2,396	3,4	99,8		18,167	0,0001320	0,2194	683,73	37,55	20,863
			AB1633	2,406	3,0	100,2		29,540	0,0001880	0,3466	865,57	33,40	18,554
			AB1642	2,413	2,7	100,5		20,406	0,0001270	0,3674	816,57	33,20	18,447
40	5	0,45	AB1613	2,404	3,1	100,1		33,570	0,0002910	0,5155	872,86	31,64	17,579
			AB1672	2,418	2,5	100,7		14,708	0,0000824	0,2084	719,67	34,83	29,028
			AB1702	2,414	2,7	100,6		13,644	0,0000624	0,2420	619,87	33,60	28,002
	3,33	0,3	AB1683	2,396	3,4	99,8		25,149	0,0001720	0,4251	705,73	29,86	24,882
			AB1692	2,416	2,6	100,6		25,149	0,0001450	0,3944	760,65	29,54	24,620
			AB1701	2,397	3,3	99,9		32,630	0,0003610	0,6425	700,42	27,38	22,816

Tabelle B1 (fortgesetzt)

Versuchsprogramm				Eigenschaften der Probekörper			Versuchsergebnisse						
T	f	σ_{ax}	Bez. PK	ρ_A	H _{bit}	k	ε_{ax} nach 16.000 LW	$\dot{\varepsilon}_{ax}$ nach 16.000 LW	$\hat{\varepsilon}_{ax}$	E	Φ	Φ	
[°C]	[Hz]	[MPa]		[g/cm³]	[Vol.-%]	[%]	[%]	[%/LW]	[%]	[MPa]	[°]	[ms]	
50	10	0,15	AB1651	2,408	2,9	100,3	9,322	0,0001150	0,2076	722,44	43,54	12,096	
			AB2131	2,405	3,0	100,2	15,801	0,0001101	0,2859	452,56	51,47	14,298	
			AB1671	2,404	3,1	100,1	24,139	0,0002210	0,4828	621,33	46,18	12,829	
		0,3	AB1673	2,41	2,8	100,4	27,470	0,0002440	0,4971	603,53	45,86	12,739	
			AB2123	2,413	2,7	100,5	36,690	0,0003996	0,7295	593,06	41,75	11,598	
			AB1622	2,418	2,5	100,7	26,650	0,0004360	0,6209	724,72	38,56	10,712	
	5	0,15	AB1802	2,418	2,5	100,7	14,940	0,0001020	0,3367	388,10	37,60	20,892	
			AB1661	2,413	2,7	100,5	31,089	0,0003040	0,5714	524,99	34,62	19,236	
		0,3	AB2033	2,390	3,6	99,6	30,557	0,0005120	0,6823	420,58	32,74	18,189	
			AB1781	2,401	3,2	100,0	51,390	0,0009390	0,8222	525,69	31,11	17,281	
3,33	0,15	AB1801	2,404	3,1	100,1	19,980	0,0001770	0,3725	351,19	33,28	27,737		
		AB1693	2,401	3,2	100,0	35,410	0,0005420	0,6454	464,81	30,11	25,091		
		AB2012	2,409	2,9	100,3	24,704	0,0002710	0,7122	400,44	28,03	23,361		
	0,45	AB2111	2,384	3,9	99,3	-	-	0,920	471,55	25,65	21,378		
		AB1782	2,421	2,4	100,8	39,990	0,0007500	0,8443	511,34	24,91	20,762		

Tabelle B2: Versuchsprogramm, Eigenschaften der Probekörper, Versuchsergebnisse – DSV (SMA 0/11S, SMA I)

Versuchsprogramm				Eigenschaften der Probekörper				Versuchsergebnisse					
T	f	σ_{ax}	Bez. PK	ρ_A	H _{bit}	k	ϵ_{ax} nach 16.000 LW	$\dot{\epsilon}_{ax}$ nach 16.000 LW	$\hat{\epsilon}_{ax}$	E	Φ	Φ	
[°C]	[Hz]	[MPa]		[g/cm³]	[Vol.-%]	[%]	[%]	[%/LW]	[%]	[MPa]	[°]	[ms]	
30	10	0,15	S42	2,506	3,9	99,2	7,478	0,0001080	0,2914	479,36	42,86	11,91	
		0,3	S12	2,523	3,3	99,9	11,580	0,0002740	0,2741	1021,26	32,10	8,92	
		0,45	S2473	2,490	4,5	98,5	-	-	0,5184	848,21	35,65	9,91	
			S2211	2,505	3,9	99,2	16,009	0,0002567	0,3953	1086,34	32,58	9,05	
	5	0,15	S2212	2,525	3,2	99,9	7,718	0,0001046	0,2084	625,27	31,49	17,49	
		0,3	S13	2,519	3,4	99,7	14,098	0,0002750	0,2908	963,67	22,20	12,34	
		0,45	S2213	2,514	3,6	99,5	23,644	0,0003716	0,4156	1035,38	23,89	13,27	
		3,33	0,3	S22	2,513	3,6	99,5	15,730	0,0002940	0,3138	892,79	19,68	16,40
	0,15		S2471	2,506	3,9	99,2	11,313	0,0001560	0,1197	1086,36	41,59	11,55	
	40	10	0,15	S2061	2,492	4,5	98,6	14,959	0,0002010	0,1865	697,01	45,90	12,75
0,3			S41	2,524	3,2	99,9	17,720	0,0001480	0,3863	724,30	39,33	10,93	
0,45			S2062	2,511	3,7	99,4	22,753	0,0001670	0,4670	599,19	39,84	11,07	
			S2472	2,523	3,3	99,9	18,400	0,0002320	0,3672	1169,76	36,81	10,23	
5		0,3	S2021	2,496	4,3	98,8	36,190	0,0003020	0,6033	711,85	38,29	10,64	
		0,3	S21	2,510	3,8	99,3	22,260	0,0001950	0,4228	662,83	28,54	15,86	
		0,3	S2031	2,505	4,0	99,1	32,026	0,0002480	0,5361	522,68	29,98	16,65	
		3,33	0,3	S32	2,514	3,6	99,5	23,920	0,0001890	0,5161	542,84	25,10	20,92
50		10	0,15	S2043	2,504	4,0	99,1	18,160	0,0001570	0,2799	464,29	48,75	13,54
			0,3	S2052	2,514	3,6	99,5	12,049	0,0000925	0,2700	481,19	48,97	13,60
	0,3		S31	2,533	2,9	100,3	22,040	0,0002060	0,5215	550,52	41,94	11,65	
	0,3		S1881	2,552	2,2	101,0	20,760	0,0001930	0,4984	561,47	41,93	11,65	
	5	0,45	S43	2,513	3,6	99,5	38,740	0,0005660	0,7228	600,81	39,63	11,01	
		0,45	S2011	2,509	3,8	99,3	49,816	0,0005590	0,7216	597,47	39,61	11,00	
3,33	5	0,3	S33	2,510	3,8	99,3	37,720	0,0004270	0,6504	431,49	29,85	16,58	
		0,3	S2022	2,517	3,5	99,6	24,014	0,0002290	0,6038	464,10	28,92	16,07	
	0,3	S23	2,526	3,1	100	27,200	0,0003090	0,6835	410,10	24,60	20,50		
	0,3	S2023	2,517	3,5	99,6	32,163	0,0003870	0,6503	431,16	24,40	20,33		

Tabelle B3: Versuchsprogramm, Eigenschaften der Probekörper, Versuchsergebnisse – DSV (SMA 0/11S, SMA II)

Versuchsprogramm				Eigenschaften der Probekörper			Versuchsergebnisse						
T	f	σ_{ax}	Bez. PK	ρ_A	H _{bit}	k	ε_{ax} nach 16.000 LW	$\dot{\varepsilon}_{ax}$ nach 16.000 LW	$\hat{\varepsilon}_{ax}$	E	Φ	Φ	
[°C]	[Hz]	[MPa]		[g/cm³]	[Vol.-%]	[%]	[‰]	[‰/LW]	[‰]	[MPa]	[°]	[ms]	
30	10	0,30	M473	2,383	1,9	102,1	8,800	0,0001820	0,3024	925,51	32,21	8,95	
			M2061	2,363	2,7	101,3	7,581	0,0001502	0,2283	1225,84	30,97	8,60	
	5	0,15	M632	2,389	1,6	102,4	5,478	0,0001160	0,0933	1399,11	25,35	14,09	
			M513	2,372	2,3	101,7	18,099	0,0003150	0,3256	860,78	23,25	12,92	
			M2062	2,370	2,4	101,6	10,610	0,0001655	0,2630	1065,90	24,00	13,33	
		0,45	M462	2,379	2,1	102,0	16,087	0,0003030	0,2716	1584,42	21,99	12,21	
			M471	2,373	2,3	101,7	10,207	0,0002330	0,1026	1272,35	20,90	17,42	
			M511	2,383	1,9	102,1	17,110	0,0003170	0,3163	885,91	20,10	16,75	
	3,33		0,3	M2063	2,362	2,8	101,2	19,819	0,0003595	0,2725	1028,23	21,77	18,14
				M651	2,333	3,9	100,0	22,990	0,0003400	0,3260	1321,22	20,41	17,00
40		0,15	M621	2,347	3,4	100,6	12,880	0,0002000	0,1287	1011,23	42,46	11,79	
			M472	2,388	1,7	102,3	18,440	0,0002040	0,4102	682,42	39,58	10,99	
	10	0,3	M2013	2,366	2,6	101,4	19,111	0,0002970	0,3445	812,42	38,66	10,74	
			M623	2,345	3,5	100,5	30,887	0,0004890	0,4015	1069,96	36,64	10,18	
	5	0,15	M622	2,370	2,4	101,6	10,210	0,0001290	0,1332	979,42	30,75	17,08	
			M463	2,367	2,6	101,4	30,870	0,0003890	0,4488	624,47	27,99	15,55	
			M2043	2,374	2,3	101,8	28,033	0,0003830	0,4045	692,81	29,49	16,38	
		0,45	M641	2,378	2,1	101,9	37,840	0,0004190	0,4285	1004,67	26,11	14,51	
			0,15	M642	2,391	1,6	102,5	15,430	0,0001850	0,1415	920,26	25,43	21,19
	50	3,33	0,3	M503	2,377	2,1	101,9	36,700	0,0004080	2,3367	119,88	25,01	20,84
M652				2,367	2,5	101,5	21,889	0,0002570	0,3281	854,31	22,61	18,84	
10		0,45	M643	2,371	2,4	101,6	37,690	0,0005240	0,5209	979,14	16,90	14,08	
			M631	2,214	8,9	94,9	17,160	0,0001550	0,2230	582,96	43,58	12,11	
			M512	2,385	1,8	102,2	29,540	0,0002590	0,5996	466,65	40,45	11,24	
5		0,3	M2021	2,367	2,6	101,4	40,110	0,0003220	0,5411	517,09	40,24	11,18	
			M501	2,385	1,8	102,2	31,240	0,0003550	0,6141	700,36	36,42	10,12	
			M2051	2,370	2,4	101,6	24,910	0,0001930	0,3018	435,23	36,28	20,15	
3,33		0,45	M493	2,383	1,9	102,1	43,260	0,0003200	0,6418	436,67	29,07	16,15	
			M2022	2,383	1,9	102,1	28,473	0,0002610	0,5997	467,26	29,30	16,28	
	0,45	M2041	2,365	2,6	101,4	46,260	0,0006490	0,7746	556,13	27,67	15,37		
		0,15	M2032	2,383	1,9	102,1	20,210	0,0001330	0,3474	379,00	32,41	27,01	
	3,33	0,3	M502	2,378	2,1	101,9	37,860	0,0003400	0,6918	405,08	23,53	19,60	
			M653	2,340	3,6	100,3	38,836	0,0004870	0,6490	431,86	22,96	19,13	
		0,45	M2031	2,372	2,3	101,7	-	-	0,8559	506,60	29,35	24,46	

Tabelle B4: Versuchsprogramm, Eigenschaften der Probekörper, Versuchsergebnisse – DSV (ABi 0/16S)

Versuchsprogramm				Eigenschaften der Probekörper				Versuchsergebnisse					
T	f	σ_{ax}	Bez. PK	ρ_A	H _{bit}	k		ε_{ax} nach 16.000 LW	$\dot{\varepsilon}_{ax}$ nach 16.000 LW	$\dot{\varepsilon}_{ax}$	E	Φ	Φ
[°C]	[Hz]	[MPa]		[g/cm³]	[Vol.-%]	[%]		[%]	[%/LW]	[%]	[MPa]	[°]	[ms]
30	10	0,15	BM1331	2,419	3,8	100,1		4,899	0,0001040	0,1715	757,76	40,36	11,21
			BM1301	2,406	4,3	99,6		11,724	0,0001910	0,2914	960,64	33,44	9,29
		0,30	BM1521	2,398	4,6	99,2		11,724	0,0001660	0,3187	878,21	34,90	9,70
		0,45	BM1511	2,410	4,1	99,7		15,738	0,0002310	0,3949	1087,38	32,70	9,08
	5	0,15	BM1652	2,393	4,8	99,0		7,120	0,0001300	0,1894	687,89	27,27	15,15
			BM1302	2,429	3,4	100,5		12,872	0,0001100	0,3390	826,45	22,58	12,55
		0,3	BM1513	2,407	4,3	99,6		14,521	0,0001920	0,3409	821,76	23,44	13,02
		0,45	BM1343	2,412	4,0	99,8		11,870	0,0001800	0,4100	1049,39	21,92	12,18
	3,33	0,15	BM1501	2,383	5,2	98,6		5,751	0,0008530	0,1967	661,23	22,64	18,86
			BM1303	2,474	1,6	102,4		13,550	0,0001680	0,3396	825,18	21,42	17,85
		0,3	BM1562	2,419	3,8	100,1		13,046	0,0001010	0,2512	1115,65	20,53	17,10
		0,45	BM1503	2,384	5,2	98,7		21,045	0,0002570	0,4884	881,46	19,57	16,31
40	10		BM1482	2,428	3,4	100,5		8,694	0,0000977	0,1602	812,35	41,66	11,57
		0,15	BM1311	2,382	5,3	98,6		8,922	0,0001140	0,1210	1076,01	43,06	11,96
			BM1282	2,412	4,1	99,8		15,388	0,0001400	0,4226	662,06	40,26	11,18
		0,3	BM1552	2,429	3,4	100,5		13,590	0,0001270	0,3726	751,08	38,89	10,80
	5		BM1313	2,395	4,8	99,1		21,570	0,0003210	0,3791	1133,21	37,84	10,51
		0,45	BM1492	2,427	3,5	100,4		17,390	0,0001640	0,4837	888,13	37,20	10,33
			BM1561	2,401	4,5	99,3		9,560	0,0000948	0,2131	610,82	32,37	17,99
		0,15	BM1312	2,426	3,5	100,4		8,816	0,0000840	0,1237	1055,52	31,11	17,28
	3,33		BM1242	2,430	3,4	100,5		19,920	0,0001540	0,4578	612,01	28,85	16,03
		0,3	BM1522	2,423	3,6	100,2		15,590	0,0001380	0,4646	603,12	29,64	16,46
			BM1523	2,405	4,3	99,5		39,114	0,0003540	0,5739	749,75	26,60	14,78
		0,45	BM1321	2,392	4,8	99,0		24,046	0,0004290	0,4325	995,79	26,34	14,63
40	3,33		BM1322	2,417	3,8	100,0		7,443	0,0000754	0,1342	969,77	25,60	21,34
		0,15	BM1551	2,416	3,9	100,0		16,485	0,0001300	0,1986	655,14	29,92	24,93
			BM1292	2,437	3,1	100,8		16,032	0,0001240	0,5000	560,46	25,95	21,63
		0,3	BM1563	2,395	4,7	99,1		19,770	0,0001970	0,4742	590,86	24,95	20,79
40	3,33		BM1323	2,404	4,4	99,5		32,730	0,0005440	0,4735	910,22	21,96	18,30
		0,45	BM1483	2,388	5,0	98,8		32,041	0,0004740	0,6217	695,10	23,26	19,38

Tabelle B4 (fortgesetzt)

Versuchsprogramm				Eigenschaften der Probekörper			Versuchsergebnisse					
T	f	σ_{ax}	Bez. PK	ρ_A	H _{bit}	k	ε_{ax} nach 16.000 LW	$\dot{\varepsilon}_{ax}$ nach 16.000 LW	$\hat{\varepsilon}_{ax}$	E	Φ	Φ
[°C]	[Hz]	[MPa]		[g/cm ³]	[Vol.-%]	[%]	[‰]	[‰/LW]	[‰]	[MPa]	[°]	[ms]
50	10	0,15	BM1503n	2,415	3,9	99,9	15,530	0,0001760	0,2881	452,50	48,78	13,55
			BM1273	2,413	4,0	99,9	22,602	0,0002320	0,5512	507,75	41,67	11,57
		0,3	BM2012	2,393	4,8	99,0	18,876	0,0002660	0,5553	504,02	41,35	11,49
		0,45	BM1511n	2,421	3,7	100,2	32,480	0,0005440	0,6774	636,75	39,66	11,02
		0,15	BM1512	2,432	3,3	100,6	10,410	0,0000765	0,2848	460,00	36,28	20,16
		0,3	BM1243	2,415	3,9	99,9	28,396	0,0002990	0,6291	445,54	29,79	16,55
	5		BM2051	2,369	5,8	98,0	36,760	0,0006870	0,6957	409,91	30,86	17,14
		0,45	BM1502	2,409	4,2	99,7	37,870	0,0008490	0,7879	551,41	27,73	15,40
		0,15	BM2052	2,359	6,2	97,6	12,936	0,0001740	0,4069	319,69	29,98	24,98
	3,33		BM1233	2,409	4,2	99,7	26,888	0,0004050	0,6929	404,96	24,34	20,28
		0,3	BM2013	2,369	5,8	98,0	44,014	0,0008250	0,6514	442,62	26,20	21,83
		0,45	BM2042	2,426	3,5	100,4	29,035	0,0003430	0,8873	486,96	22,46	18,72

Tabelle B5: Versuchsprogramm, Eigenschaften der Probekörper, Versuchsergebnisse – DSV (ATS 0/32 CS)

Versuchsprogramm				Eigenschaften der Probekörper			Versuchsergebnisse					
T	f	σ_{ax}	Bez. PK	ρ_A	H _{bit}	k	ε_{ax} nach 16.000 LW	$\dot{\varepsilon}_{ax}$ nach 16.000 LW	$\hat{\varepsilon}_{ax}$	E	Φ	Φ
[°C]	[Hz]	[MPa]		[g/cm ³]	[Vol.-%]	[%]	[‰]	[‰/LW]	[‰]	[MPa]	[°]	[ms]
30	10	0,15	T43	2,439	4,2	100,2	4,711	0,0000884	0,0867	1466,45	34,58	9,61
			T221	2,431	4,5	101,7	7,970	0,0001230	0,1778	1597,43	31,47	8,74
		0,30	T1231	2,362	7,2	98,8	11,732	0,0001790	0,2267	1231,68	32,93	9,15
		0,45	T242	2,458	3,4	102,8	7,887	0,0001070	0,2556	1722,23	31,70	8,80
		0,15	T61	2,433	4,4	101,8	7,341	0,0001040	0,0943	1400,76	24,60	13,67
			T42	2,468	3,0	103,2	9,950	0,0001220	0,1728	1607,96	21,15	11,75
	5	0,3	T1221	2,349	7,7	98,3	19,325	0,0002560	0,2570	1091,06	25,32	14,06
			T252	2,456	3,5	102,7	10,530	0,0001330	0,2480	1748,57	20,80	11,56
		0,15	T52	2,468	3,0	103,2	7,090	0,0000673	0,1024	1209,16	20,61	17,17
	3,33		T63	2,422	4,8	101,3	9,910	0,0001140	0,1868	1536,69	18,41	15,34
		0,3	T1233	2,370	6,9	99,1	24,275	0,0003650	0,2681	1042,33	21,99	18,33
		0,45	T213	2,447	3,9	102,3	12,830	0,0001490	0,2607	1697,82	18,10	15,08

Tabelle B5 (fortgesetzt)

Versuchsprogramm				Eigenschaften der Probekörper				Versuchsergebnisse					
T	f	σ_{ax}	Bez. PK	ρ_A	H _{bit}	k		ε_{ax} nach 16.000 LW	$\dot{\varepsilon}_{ax}$ nach 16.000 LW	$\hat{\varepsilon}_{ax}$	E	Φ	Φ
[°C]	[Hz]	[MPa]		[g/cm³]	[Vol.-%]	[%]		[‰]	[‰/LW]	[‰]	[MPa]	[°]	[ms]
40	10	0,15	T71	2,416	5,1	101,0		8,690	0,0001160	0,1164	1134,55	41,22	11,45
			T222	2,440	4,1	102,0		9,400	0,0001060	0,2289	1277,69	36,23	10,06
		0,3	T1783	2,377	6,6	99,4		16,605	0,0002220	0,3495	809,10	37,68	10,47
		0,45	T212	2,446	3,9	102,3		13,930	0,0001480	0,3271	1368,15	36,19	10,05
		0,15	T72	2,458	3,4	102,8		7,620	0,0000763	0,1260	1035,62	28,12	15,62
			T73	2,427	4,7	101,5		21,800	0,0003120	0,2521	1112,90	24,90	13,84
	5	0,3	T1471	2,393	6,0	100,1		28,776	0,0004090	0,4085	712,84	29,33	16,29
			T251	2,446	3,9	102,3		19,860	0,0003470	0,3724	1224,90	24,22	13,45
		0,45	T1223	2,359	7,3	98,6		47,421	0,0017500	0,5706	760,15	26,67	14,81
		0,15	T93	2,424	4,8	101,4		10,590	0,0001010	0,1285	1039,85	22,00	18,33
			T82	2,443	4,0	102,2		17,050	0,0002360	0,2712	1012,28	21,00	17,50
		0,3	T1472	2,397	5,8	100,2		22,312	0,0003300	0,4373	669,06	26,17	21,81
50	10		T83	2,439	4,2	102,0		27,700	0,0006080	0,3733	1159,21	20,58	17,15
		0,45	T1093	2,357	7,4	98,6		64,189	0,0026700	0,6121	709,47	23,23	19,36
		0,15	T1741	2,377	6,5	99,5		15,375	0,0002837	0,2597	501,29	46,65	12,96
			T312	2,468	3,0	103,2		12,998	0,0001510	0,4865	603,85	39,02	10,84
		0,3	T1473	2,374	6,7	99,3		41,414	0,0011000	0,5412	524,75	40,33	11,20
		0,45	T1742	2,393	6,0	100,1		61,301	0,0031720	0,6461	667,42	36,54	10,15
	5	0,15	T1743	2,372	6,8	99,2		23,160	0,0003722	0,2862	457,99	34,27	19,04
			T301	2,436	4,3	101,9		22,000	0,0003900	0,5126	553,63	27,61	15,34
		0,3	T1091	2,383	6,4	99,6		59,163	0,0018500	0,5591	507,50	29,47	16,37
		0,45	T1753	2,362	7,2	98,8		-	-	0,7375	593,76	29,12	16,18
		0,15	T1751	2,384	6,3	99,7		24,113	0,0004389	0,3301	396,23	30,73	25,61
			T302	2,461	3,3	102,9		18,685	0,0002420	0,5644	525,51	22,74	18,95
3,33		0,3	T1782	2,388	6,2	99,9		46,558	0,0019400	0,5720	496,99	25,88	21,57
		0,45	T1752	2,388	6,2	99,9		-	-	0,7133	495,72	20,82	17,35

Tabelle C1: Approximation ab dem 1. LW – DSV (AB)

T [° C]	f [Hz]	σ _{ax} [MPa]	Probe- körper	max. LWI	Gleichung 4-18					Gleichung 4-17					Gleichung 4-19							
					ε ₀	a	k	b	c	R ²	S _{appr./} S _{orig.}	a	k	b	c	R ²	S _{appr./} S _{orig.}	A1	A2	A3	R ²	S _{appr./} S _{orig.}
30	10	0,15	AB1652	17499	-0,8420	0,7868	0,2264	0	0	99,92	1,16	0,3881	0,2883	0	0	99,54	1,28	1,0735	-0,0422	0,0977	99,70	1,25
			AB2132	99499	-4,9104	4,2676	0,1065	0	0	99,56	1,60	0,9992	0,1989	0	0	98,16	2,01	1,0804	0,0357	0,0761	99,22	1,78
		0,3	AB1682	99499	-12,6063	10,5195	0,0808	0	0	98,29	2,11	1,4093	0,2025	0	0	95,50	2,83	1,0008	0,1548	0,0798	96,65	2,19
			AB1611	99499	-10,9008	7,2417	0,1285	0	0	98,27	1,96	1,2161	0,2496	0	0	95,80	2,54	1,6101	0,3548	0,0858	83,20	1,41
		0,45	AB1653	15999	-2,7718	2,1572	0,2393	0	0	99,59	1,51	0,9546	0,3122	0	0	99,08	1,78	1,1580	0,1688	0,1208	97,17	1,85
	AB1612		99499	-18,1928	14,2299	0,0863	0	0	97,88	2,12	1,6739	0,2194	0	0	94,57	2,89	1,0933	0,3667	0,0868	91,30	2,0	
	5	0,15	AB1663	99499	-4,8338	3,6407	0,1209	0	0	99,07	1,8	0,7468	0,2261	0	0	97,23	2,29	0,9107	0,0314	0,0746	98,22	1,95
			AB1662	38499	-7,8785	6,2960	0,1239	0	0	98,62	1,91	1,2860	0,2389	0	0	96,40	2,46	0,8876	0,1911	0,0828	95,07	1,58
		0,3	AB2011	99499	-18,1777	17,1542	0,0663	0	0	99,10	1,77	2,7108	0,1697	0	0	97,07	2,33	1,1302	0,2597	0,0814	97,39	2,15
			AB1511	99499	-1601,39	1599,92	0,0022	0	0	98,36	1,89	9,5276	0,1271	0	0	91,68	2,65	11,943	7,3033	0,0854	79,03	1,96
40		10	0,45	AB2133	99499	-42,4922	38,4953	0,0529	0	0	97,86	1,92	3,7416	0,1783	0	0	93,94	2,64	1,8441	0,9939	0,0820	79,01
	AB1623			99499	-10,0385	7,7911	0,1001	0	0	98,68	1,89	1,2094	0,2191	0	0	96,17	2,5	0,6708	0,1770	0,0704	95,04	1,56
	0,3		AB1691	24499	-10,3590	8,6705	0,1194	0	0	98,82	1,78	1,6963	0,2415	0	0	96,63	2,21	0,6442	0,3424	0,0880	92,60	1,45
			AB2013	99499	-135,635	132,828	0,0150	0	0	98,78	1,83	3,8926	0,1547	0	0	94,59	2,71	1,3573	0,7606	0,0699	89,55	1,58
	0,45		AB1703	99499	-69,0839	64,4051	0,0352	0	0	98,53	1,43	3,7577	0,1760	0	0	94,49	2,08	1,9014	1,1932	0,0776	81,81	1,21
		AB52	52499	-34,7312	32,6078	0,0341	0	0	97,78	2,1	1,7002	0,1878	0	0	92,93	3,09	1,1344	0,1486	0,0795	96,70	2,45	
	5	0,3	AB51	53999	-103,370	100,313	0,0235	0	0	99,12	1,3	4,2739	0,1706	0	0	94,84	1,93	2,3632	0,8474	0,0985	94,33	1,74
			AB1631	99499	-444,678	441,662	0,0051	0	0	98,00	1,6	3,9580	0,1623	0	0	86,60	2,74	2,3950	0,8904	0,0725	91,35	1,25
		0,45	AB53	49499	-445,013	443,247	0,0078	0	0	99,70	1,01	7,7357	0,1493	0	0	95,59	1,51	9,9950	3,6313	0,1045	88,58	1,44
			AB1681	99499	-116,636	113,668	0,0241	0,0683	3,58*10 ⁻⁵	99,78	1,24	5,5422	0,1614	0	0	97,41	0,77	3,9824	1,5728	0,1022	95,53	1,33
50		10	0,15	AB1632	32999	-72,1187	69,7796	0,0228	0	0	98,09	2,25	2,4866	0,1861	0	0	93,01	3,46	1,0875	0,3120	0,0802	95,93
	AB1643			27499	-37,4922	35,4065	0,0474	0	0	98,90	1,7	2,8320	0,1962	0	0	95,17	2,53	1,2794	0,5149	0,0822	93,54	1,43
	0,3		AB1633	99499	-1101,35	1097,90	0,0030	0	0	98,28	1,17	7,2504	0,1394	0	0	92,00	1,71	6,9794	3,6915	0,0822	79,22	1,09
			AB1642	31999	-565,921	565,087	0,009	0	0	99,19	1,31	4,8484	0,1514	0	0	93,41	1,97	2,1979	0,7915	0,0782	94,30	1,17
	0,45		AB1613	40499	-268,226	266,1380	0,0131	0,0043	1,0*10 ⁻⁴	99,81	0,81	7,3356	0,1585	0	0	95,99	1,09	5,5021	3,118	0,1010	90,72	1,18
		AB1672	99499	-1164,37	1163,96	0,0013	0	0	97,17	2,14	4,1895	0,1234	0	0	89,99	2,97	1,0790	0,4236	0,0591	96,16	1,99	
	3,33	0,15	AB1702	89499	-1164,20	1164,12	0,0012	0	0	97,20	1,75	4,0122	0,1217	0	0	89,93	2,42	1,0581	0,4436	0,0502	96,58	1,43
			AB1683	94499	-1158,54	1157,255	0,0024	0,0138	5,18*10 ⁻⁵	99,68	1,14	6,5367	0,1387	0	0	96,22	0,74	2,0583	1,1909	0,0892	97,25	1,04
		0,3	AB1692	17999	-1161,52	1160,62	0,0024	0	0	98,83	1,48	5,8111	0,1591	0	0	92,43	2,21	2,0203	1,3187	0,0892	93,83	1,48
			AB1701	99499	-34,1370	36,5511	0,0602	2,9153	2,32*10 ⁻⁵	99,72		5,0268	0,1994	0,0302	6,0*10 ⁻⁵	97,59						
10		0,15	AB1651	18499	-5,3941	4,686	0,1195	0	0	99,66		0,9539	0,2413	0	0	97,61		1,1347	0,0431	0,0932	99,36	
	AB 2131		99499	-525,097	524,449	0,0032	0	0	99,40		4,3486	0,1300	0	0	94,54		2,8280	0,3510	0,0750	93,11		
	0,3	AB1671	55999	-597,856	596,2472	0,0043	0,6865	3,41*10 ⁻⁵	99,92		4,9116	0,1664	0	0	97,85		2,6869	0,8433	0,1073	99,13		
		AB1673	79999	-1262,60	1262,070	0,0023	0,2536	3,37*10 ⁻⁵	99,80		6,8961	0,1438	0	0	97,09		4,6462	1,8121	0,1028	97,47		
	0,45	AB1622	55499	-1265,48	1261,125	0,0024	0,3304	9,16*10 ⁻⁵	99,41		4,6688	0,1719	0,3304	9,2*10 ⁻⁵	98,95							
AB2123		9499	-47,950	49,3426	0,0575	0,0213	0,89*10 ⁻⁵	97,28		8,589	0,1526	0,0213	9,0*10 ⁻⁵	97,18								

höchstes Bestimmtheitsmaß bzw. geringste Abweichung der Steigung S_{appr.} von S_{orig.}

Tabelle C1: (fortgesetzt)

T [° C]	f [Hz]	σ_{ax} [MPa]	Probe- körper	max. LWI	Gleichung 4-18					Gleichung 4-17					Gleichung 4-19							
					ε_0	a	k	b	c	R ²	S _{appr./} S _{orig.}	a	k	b	c	R ²	S _{appr./} S _{orig.}	A1	A2	A3	R ²	S _{appr./} S _{orig.}
50	5	0,15	AB1802	34999	-1263,13	1262,891	0,0012	0	0	99,48		3,7809	0,1440	0	0	93,82		1,3860	0,3997	0,0721	99,11	
		0,3	AB1661	45499	-1261,71	1261,303	0,0025	0,3420	5,63*10 ⁻⁵	99,89		7,1360	0,1543	0	0	97,26		4,1948	2,4680	0,1028	97,78	
			AB2033	65499	-1265,64	1261,771	0,0027	0,0532	1,16*10 ⁻⁴	96,56		5,4148	0,1790	0,0532	1,2*10 ⁻⁴	96,89		Formel nicht geeignet				
	0,45	AB1781	21499	-1255,35	1256,060	0,0036	0,9046	1,2*10 ⁻⁴	99,84		6,6968	0,2554	28,283	-2,1*10 ⁻⁴	99,11		20,2288	10,7543	0,1178	89,51		
		AB1801	99499	-1261,61	1260,750	0,0017	1,2895	1,37*10 ⁻⁵	99,92		4,5738	0,1534	0	0	98,12		1,4824	0,4819	0,0891	88,53		
3,33	0,3	AB1693	32499	-1255,78	1256,989	0,0025	1,3293	7,33*10 ⁻⁵	99,87		7,6383	0,1567	0,1012	1,4*10 ⁻⁴	98,10		3,3948	2,3797	0,1076	98,40		
		AB2012	99499	-1262,50	1261,748	0,0021	0,3008	5,19*10 ⁻⁵	99,56		6,6455	0,1341	0,3008	5,1*10 ⁻⁵	99,26		Formel nicht geeignet					
	0,45	AB1782	28499	-1255,78	1256,990	0,0025	3,6927	6,33*10 ⁻⁵	99,72		8,0784	0,1598	0,2339	1,4*10 ⁻⁴	98,58		5,4824	3,8819	0,1090	95,23		
		AB2111	10999	-9,5346	14,2846	0,1402	0,7421	3,85*10 ⁻⁴	99,63		7,3311	0,1918	0,7421	3,9*10 ⁻⁴	99,55		Formel nicht geeignet					

■ höchstes Bestimmtheitsmaß bzw. geringste Abweichung der Steigung S_{appr.} von S_{orig.}

Tabelle C2: Approximation ab dem 100. LW – DSV (AB)

T [° C]	f [Hz]	σ _{ax} [MPa]	Probe- körper	max. LW	Gleichung 4-18					Gleichung 4-17					Gleichung 4-19							
					ε ₀	a	k	b	c	R ²	S _{appr./} S _{orig.}	a	k	b	c	R ²	S _{appr./} S _{orig.}	A1	A2	A3	R ²	S _{appr./} S _{orig.}
30	10	0,15	AB1652	17499	-1,8578	1,3447	0,1841	0	0	99,95	1,09	0,4120	0,2815	0	0	99,62	1,25	1,0397	-0,0322	0,0957	99,80	1,23
			AB2132	99499	-17,4833	15,1573	0,0502	0	0	99,80	1,41	1,0688	0,1925	0	0	98,17	1,94	0,7104	0,1507	0,0578	99,48	1,27
		0,3	AB1682	99499	-366,106	359,6636	0,0048	0	0	99,35	1,79	1,5311	0,1947	0	0	94,92	2,71	0,4564	0,2463	0,0778	98,85	2,20
			AB1611	99499	-166,588	154,004	0,0169	0	0	99,55	1,53	1,3036	0,2431	0	0	95,28	2,46	-0,5199	0,4990	0,0927	98,58	2,18
			AB1653	15999	-13,6038	8,9763	0,1318	0	0	99,86	1,26	1,0177	0,3049	0	0	98,89	1,73	-0,0985	0,4817	0,1108	99,32	1,29
	5	0,15	AB1612	99499	-625,110	614,0274	0,0043	0	0	99,31	1,78	1,8333	0,2109	0	0	93,91	2,76	0,9138	0,4667	0,0868	96,40	2,10
			AB1663	99499	-31,1710	27,1094	0,0355	0	0	99,74	1,49	0,7991	0,2197	0	0	97,00	2,22	0,5462	0,1155	0,0646	99,63	1,58
		0,3	AB1662	38499	-230,403	223,0125	0,0091	0	0	99,65	1,5	1,4210	0,2284	0	0	95,83	2,33	-0,1200	0,3680	0,0796	99,41	1,62
			AB2011	99499	-332,018	326,8762	0,0061	0	0	99,66	1,55	2,9121	0,1629	0	0	96,80	2,22	-0,3846	0,5667	0,0735	99,42	1,7
			AB1511	99499	-1600,31	1601,004	0,0021	0	0	98,03	1,77	11,375	0,1101	0	0	94,44	2,26	3,7919	7,3826	0,0835	86,45	1,79
40	3,33	0,15	AB2133	99499	-1036,86	1027,26	0,0031	0	0	98,49	1,73	4,2107	0,1671	0	0	93,26	2,45	-6,1589	2,3029	0,08	97,57	1,65
			AB1623	99499	-226,021	218,5837	0,0083	0	0	99,66	1,54	1,3117	0,2115	0	0	95,84	2,40	-0,1210	0,2781	0,0704	99,38	1,71
		0,3	AB1691	24499	-318,638	310,587	0,0080	0	0	99,66	1,44	1,9350	0,2269	0	0	96,26	2,05	-0,7058	0,5401	0,0880	99,39	1,70
			AB2013	99499	-662,027	657,73	0,0035	0	0	98,79	1,83	4,3848	0,1433	0	0	94,67	2,49	-2,6310	1,1912	0,0699	99,27	1,78
			AB1703	99499	-850,463	841,7511	0,0037	0	0	99,09	1,36	4,2333	0,1647	0	0	94,41	1,93	-0,9929	1,0266	0,0856	95,38	2,08
	10	0,15	AB52	52499	-429,202	425,33	0,0035	0	0	98,03	2,02	1,984	0,1720	0	0	92,36	2,79	0,2254	0,4418	0,0503	99,30	1,64
			AB51	53999	-622,28	617,23	0,0045	0	0	99,26	1,26	4,9861	0,1548	0	0	95,62	1,72	-3,0411	2,14	0,0881	99,51	1,28
		0,3	AB1631	99499	-654,13	650,91	0,0035	0	0	97,15	1,46	5,5806	0,1236	0	0	92,52	1,90	-1,3846	1,5509	0,0705	99,01	1,34
			AB53	49499	-606,33	604,40	0,0058	0	0	99,66	1,01	9,0153	0,1333	0	0	97,44	1,32	-18,196	9,6331	0,0965	99,13	1,07
			AB1681	99499	-116,64	113,67	0,0241	0,0683	3,58*10 ⁻⁵	99,84	1,24	6,2307	0,1502	0	0	98,89	0,71	-4,6937	3,2406	0,0993	99,91	0,99

■ höchstes Bestimmtheitsmaß bzw. geringste Abweichung der Steigung S_{appr.} von S_{orig.}

Tabelle C2: (fortgesetzt)

T [° C]	f [Hz]	σ _{ax} [MPa]	Probe- körper	max. LW	Gleichung 4-18					Gleichung 4-17					Gleichung 4-19								
					ε ₀	a	k	b	c	R ²	S _{appr./} S _{orig.}	a	k	b	c	R ²	S _{appr./} S _{orig.}	A1	A2	A3	R ²	S _{appr./} S _{orig.}	
40	5	0,15	AB1632	32999	-494,79	491,17	0,0038	0	0	97,77	2,20	3,0179	0,1650	0	0	92,89	3,01	-1,4245	0,965	0,0490	99,44	1,58	
			AB1643	27499	-456,23	451,39	0,0052	0	0	99,14	1,56	3,3868	0,1764	0	0	95,59	2,23	-1,7419	1,1212	0,0750	99,63	1,38	
			AB1633	99499	-1167,44	1164,86	0,0028	0	0	97,65	1,14	8,5785	0,1233	0	0	93,38	1,49	-6,728	4,0448	0,089	95,92	1,76	
			AB1642	31999	-565,46	565,55	0,0037	0	0	98,95	1,24	6,008	0,1277	0	0	96,34	1,62	-2,7553	1,925	0,0637	99,93	1,01	
			AB1613	40499	-268,23	266,14	0,0131	0,0043	1,0*10 ⁻⁴	99,85	0,81	8,6904	0,1404	0	0	98,70	0,95	7,591	3,095	0,1017	91,25	1,25	
3,33	5	0,15	AB1672	99499	-1143,60	1144,12	0,0012	0	0	99,82	2,01	5,0075	0,1063	0	0	91,34	2,51	-0,6225	0,8285	0,0427	98,72	1,59	
			AB1702	89499	-1163,68	1164,64	0,0011	0	0	96,20	1,62	4,8422	0,1033	0	0	99,01	2,02	-2,1387	1,239	0,0063	99,82	0,99	
			AB1683	94499	-1158,54	1157,26	0,0024	0,0138	5,18*10 ⁻⁵	99,74	1,12	7,5156	0,1252	0	0	98,90	0,66	2,9367	1,1651	0,0892	97,91	1,04	
			AB1692	17999	-1160,49	1161,65	0,0022	0	0	98,83	1,35	7,6453	0,1271	0	0	96,83	1,71	-8,4474	3,7678	0,0694	99,93	1,08	
			AB1701	99499	-38,50	41,72	0,0634	2,9163	2,32*10 ⁻⁵	99,85		5,1920	0,1963	0,0302	6,0*10 ⁻⁴	97,21		Formel nicht geeignet					
10	5	0,15	AB1651	18499	-9,9354	8,4588	0,0811	-0,7155	-1,8*10 ⁻³	99,99		1,1143	0,2236	0	0	98,54		0,8280	0,1645	0,0733	99,98		
			AB2131	99499	-322,94	323,08	0,0049	0	0	99,47		5,0909	0,1149	0	0	97,41		0,3629	0,8874	0,0617	99,95		
			AB1671	55999	-597,789	596,3146	0,0043	0,6865	3,41*10 ⁻⁵	99,96		5,764	0,1490	0,0048	1,0*10 ⁻⁴	99,66		0,5075	1,4558	0,1044	99,94		
			AB1673	79999	-1262,60	1262,07	0,0023	0,2536	3,37*10 ⁻⁵	99,86		8,1379	0,1265	0,0058	7,3*10 ⁻⁵	99,51		-1,0897	3,0261	0,101	99,90		
			AB1622	55499	-1266,35	1260,26	0,0025	0,3304	9,16*10 ⁻⁵	99,48		5,2714	0,1595	0,3304	9,1*10 ⁻⁵	99,82		Formel nicht geeignet					
50	5	0,45	AB2123	94999	-127,47	128,96	0,0254	0,0213	8,99*10 ⁻⁵	96,64		9,3462	0,1445	0,0213	8,95*10 ⁻⁵	97,11		Formel nicht geeignet					
			AB1802	34999	-1262,75	1263,276	0,0012	0	0	99,58		4,6366	0,1216	0	0	97,66		0,2369	0,7545	0,0523	99,99		
			AB1661	45499	-1260,56	1261,57	0,0024	1,0972	3,61*10 ⁻⁵	99,96		8,5389	0,1341	0,0307	9,3*10 ⁻⁵	99,70		-4,991	3,893	0,1017	99,98		
			AB2033	65499	2,9361	4,1385	0,1961	0,0532	1,16*10 ⁻⁴	96,71		5,7221	0,1735	0,0451	1,2*10 ⁻⁴	96,76		Formel nicht geeignet					
			AB1781	21499	-1255,35	1256,06	0,0036	0,9046	1,2*10 ⁻⁴	99,84		6,6968	0,2554	28,2826	-2,1*10 ⁻⁴	99,41		-63,76	27,103	0,1179	99,54		
3,33	5	0,15	AB1801	99499	-1261,61	1260,751	0,0017	1,2895	1,37*10 ⁻⁵	99,95		5,3881	0,1360	0,0304	4,1*10 ⁻⁵	99,71		1,2476	0,5813	0,0882	99,79		
			AB1693	32499	-1255,78	1256,99	0,0025	1,3293	7,3*10 ⁻⁵	99,90		8,9286	0,1385	0,2465	1,2*10 ⁻⁵	99,82		-2,2925	3,2813	0,108	99,97		
			AB2012	99499	-1262,66	1261,60	0,0021	0,3008	5,19*10 ⁻⁵	99,50		6,9518	0,1298	0,3008	5,1*10 ⁻⁵	99,52		Formel nicht geeignet					
			AB1782	28499	-1254,27	1258,5	0,0024	5,6724	4,8*10 ⁻⁵	99,98		8,0784	0,1598	0,2339	1,4*10 ⁻⁴	99,39		-13,104	6,3597	0,1090	99,23		
			AB2111	10999	12,3391	1,6318	0,3199	0,7421	3,85*10 ⁻⁴	99,76		7,6883	0,1861	0,7421	3,9*10 ⁻⁴	99,68		Formel nicht geeignet					

■ höchstes Bestimmtheitsmaß bzw. geringste Abweichung der Steigung S_{appr.} von S_{orig.}

Tabelle C 3: Approximation ab dem 1. LW – DSV (SMA 0/11S, SMA I)

T [° C]	f [Hz]	σ_{ax} [MPa]	Probe- körper	max. LW	ε_0	a	k	b	c	R ²
30	10	0,15	S42	18.499	-1,6735	1,7943	0,1689	0	0	99,97
		0,3	S12	99.499	-1,4816	1,0315	0,2599	0	0	99,74
		0,45	S2473	599	-0,1202	0,6380	0,3523	0	0	99,71
			S2211	99.499	-8,1080	6,3767	0,1349	0	0	99,42
	5	0,15	S2212	99.499	-5,0198	4,6430	0,1029	0	0	99,74
		0,3	S13	99.499	-4,4522	2,9967	0,1845	0	0	99,26
		0,45	S2213	99.499	-15,4163	11,5295	0,1230	0	0	98,87
	3,33	0,3	S22	99.499	-6,4495	4,4833	0,1618	0	0	99,23
40	10	0,15	S2471	99.499	-10,8828	8,1681	0,1007	0	0	98,4
			S2061	99.499	-16,2566	13,3647	0,0854	0	0	98,62
		0,3	S41	99.499	-107,6157	104,5758	0,0183	0	0	98,79
			S2062	99.499	-584,2178	583,1180	0,0041	0	0	99,55
		0,45	S2472	99.499	-14,2374	11,6655	0,1056	0	0	99,63
			S2021	99.499	-220,6254	214,5112	0,0184	0	0	99,16
	5	0,3	S21	99.499	-73,1158	69,7499	0,0320	0	0	99,24
			S2031	99.499	-352,067	348,430	0,01	0	0	99,40
	3,33	0,3	S32	99.499	-175,998	173,595	0,0146	0	0	99,63
50	10	0,15	S2043	99.499	-146,031	143,1195	0,0141	0	0	99,43
			S2052	99.499	-246,892	246,045	0,0053	0	0	99,66
		0,3	S31	99.499	-45,9065	44,3945	0,0445	0	0	99,61
			S1881	99.499	-80,5902	79,6135	0,0249	1,2435	$1,19 \cdot 10^{-5}$	99,89
		0,45	S43	97.999	-21,1803	21,3973	0,1075	0,3350	$6,17 \cdot 10^{-5}$	96,97
			S2011	99.499	-31,1640	30,6189	0,1014	3,1918	$2,09 \cdot 10^{-5}$	99,50
	5	0,3	S33	99.499	-27,393	31,1422	0,0752	2,6835	$2,31 \cdot 10^{-5}$	99,78
			S2022	99.499	-46,920	48,3315	0,0394	2,3976	$1,12 \cdot 10^{-5}$	99,69
	3,33	0,3	S23	99.499	-970,355	973,195	0,0024	12,2911	$8,32 \cdot 10^{-6}$	99,73
			S2023	99.499	-154,630	154,827	0,0188	4,2677	$1,82 \cdot 10^{-5}$	99,91

Tabelle C 4: Approximation ab dem 1. LW – DSV (SMA 0/11S, SMA II)

T [° C]	f [Hz]	σ_{ax} [MPa]	Probe- körper	max. LW	ε_0	a	k	b	c	R ²
30	10	0,3	M473	99.499	-0,5806	0,7220	0,2645	0	0	99,98
			M2061	99.499	-0,7614	0,8110	0,2403	0	0	99,99
		0,15	M632	99.499	-1,4584	0,7949	0,2215	0	0	99,74
			M513	99.499	-1,8285	2,7271	0,2051	0	0	99,96
	5	0,3	M2062	99.499	-3,3318	3,1405	0,1533	0	0	99,94
			M462	99.499	-5,8354	3,6047	0,1841	0	0	99,56
		0,45	M471	99.499	-2,6049	1,2579	0,2373	0	0	99,68
			M511	99.499	-4,5622	3,4199	0,1891	0	0	99,78
	3,33	0,3	M2063	99.499	-4,2271	3,3602	0,2017	0	0	99,86
			M651	99.499	-14,7685	11,1829	0,1240	0	0	99,47
		0,45	M621	99.499	-10,0314	7,0653	0,1188	0	0	98,73
			M472	99.499	-32,7947	30,0904	0,0537	0	0	99,12
40	10	0,3	M2013	99.499	-9,8323	8,0155	0,1305	0	0	99,53
			M623	99.499	-10,7026	7,7595	0,1729	0,2606	$3,04 \cdot 10^{-5}$	99,85
		0,45	M622	99.499	-12,7168	10,4494	0,0793	0	0	98,67
			M463	99.499	-31,2540	26,1424	0,0874	0	0	98,99
	5	0,3	M2043	99.499	-21,0850	18,1725	0,1006	0	0	99,29
			M641	99.499	-46,8002	39,5532	0,0776	0	0	99,11
		0,45	M642	99.499	-25,3029	21,4529	0,0643	0	0	98,11
			M503	99.499	-75,9709	68,5354	0,0501	0	0	98,8
	3,33	0,3	M652	99.499	-26,3790	23,3248	0,0745	0	0	99,66
			M643	99.499	-19,6022	16,5117	0,1279	1,0149	$2,15 \cdot 10^{-5}$	99,89
		0,45	M631	99.499	-64,5876	60,5342	0,304	0	0	98,34
			M512	99.499	-145,758	142,999	0,0210	0	0	99,8
50	10	0,3	M2021	99.499	-252,702	247,167	0,0173	0	0	99,25
			M501	59.499	-30,7917	27,9270	0,0827	0	0	99,78
		0,45	M2051	36.999	-75,9290	72,6779	0,0340	0	0	98,84
			M493	99.499	-1028,39	1024,84	0,0046	0	0	99,53
	5	0,3	M2022	99.499	-71,447	70,067	0,037	0	0	99,82
			M2041	31.999	-55,319	54,074	0,063	1,550	$4,91 \cdot 10^{-5}$	99,95
		0,45	M2032	26.999	-151,176	149,318	0,0145	0	0	99,26
			M502	99.499	-81,953	81,477	0,0403	0,25	$2,5 \cdot 10^{-5}$	99,80
	3,33	0,3	M653	99.499	-42,5028	43,9473	0,0621	5,333	$1,83 \cdot 10^{-5}$	99,98
			M2031	1.499	-133,62	130,9	0,0454	0	0	99,56

Tabelle C 5: Approximation ab dem 1. LW – DSV (ABi 0/16S)

T [° C]	f [Hz]	σ_{ax} [MPa]	Probe- körper	max. LW	ε_0	a	k	b	c	R ²
30	10	0,15	BM1331	99.499	-0,9558	0,6215	0,2297	0	0	99,79
		0,3	BM1301	99.499	-4,5694	3,6394	0,1522	0	0	99,64
			BM1521	99.499	-6,1866	5,2290	0,1262	0	0	99,85
		0,45	BM1511	99.499	-6,6091	5,9447	0,1360	0	0	99,93
	5	0,15	BM1652	99.499	-2,6274	1,7992	0,1723	0	0	99,63
		0,3	BM1302	99.499	-128,403	127,43	0,0105	0	0	99,46
			BM1513	99.499	-11,8854	10,255	0,0965	0	0	99,65
		0,45	BM1343	99.499	-5,9067	4,7083	0,1355	0	0	99,61
	3,33	0,15	BM1501	99.499	-3,2640	2,6908	0,1235	0	0	99,73
		0,3	BM1303	99.499	-12,508	11,037	0,0871	0	0	99,32
			BM1562	99.499	-28,672	27,968	0,0368	0	0	99,46
		0,45	BM1503	99.499	-17,544	15,809	0,0915	0	0	99,83
40	10	0,15	BM1482	99.499	-16,296	14,656	0,0539	0	0	98,88
			BM1311	99.499	-10,7543	8,6967	0,0823	0	0	98,53
		0,3	BM1282	99.499	-40,5630	39,716	0,0353	0	0	99,87
			BM1552	99.499	-63,6548	61,238	0,0234	0	0	98,86
		0,45	BM1313	99.499	-3,5426	2,7767	0,2423	8,443	-3,710 ⁻⁵	99,98
	5		BM1492	99.499	-38,1713	36,702	0,0426	0	0	99,78
		0,15	BM1561	99.499	-26,098	25,01	0,036	0	0	99,48
			BM1312	99.499	-32,505	30,321	0,0312	0	0	98,14
		0,3	BM1242	99.499	-283,04	281,32	0,0076	0	0	99,48
			BM1522	99.499	-49,9034	48,274	0,0314	0	0	99,71
		0,45	BM1523	99.499	-18,8941	18,222	0,0982	0,896	1,73*10 ⁻⁵	99,97
			BM1321	99.499	-3,4918	3,5837	0,2078	2,043	2,26*10 ⁻⁵	99,95
	3,33	0,15	BM1322	99.499	-21,4027	19,839	0,0379	0	0	98,87
			BM1551	99.499	-166,126	164,03	0,0099	0	0	99,20
		0,3	BM1292	99.499	-69,928	70,045	0,0212	0	0	99,85
			BM1563	99.499	-32,711	30,724	0,0553	0	0	99,78
		0,45	BM1323	99.499	-14,445	12,31	0,1363	2,543	2,65*10 ⁻⁵	99,97
			BM1483	85.999	-30,8434	29,448	0,0753	12,01	9,45*10 ⁻⁶	99,98
50	10	0,15	BM1503	86.499	-12,833	12,146	0,0879	0	0	99,94
		0,3	BM1273	99.499	-50,0763	49,292	0,0399	1,280	1,35*10 ⁻⁵	99,95
			BM2012	99.499	-6,3622	7,397	0,1245	3,334	1,17*10 ⁻⁵	99,91
		0,45	BM1511	61.999	-12,447	13,300	0,1215	3,395	2,90*10 ⁻⁵	99,96
	5	0,15	BM1512	35.499	-207,466	206,95	0,0054	0	0	99,72
		0,3	BM1243	99.499	-673,039	672,47	0,0043	3,578	1,65*10 ⁻⁵	99,94
			BM2051	69.499	8,4565	0,6142	0,4019	0,002	1,57*10 ⁻⁴	99,06
		0,45	BM1502	44.499	7,5526	0,7995	0,3822	0,001	2,53*10 ⁻⁴	98,67
	3,33	0,15	BM2052	99.499	-5,8232	6,5715	0,1070	2,421	8,78*10 ⁻⁶	99,95
		0,3	BM1233	99.499	-13,8625	15,988	0,0918	6,484	1,78*10 ⁻⁵	99,95
			BM2013	74.499	13,7792	0,2247	0,5152	2*10 ⁻⁴	1,76*10 ⁻⁴	98,61
		0,45	BM2042	99.499	16,311	0,0169	0,6803	1,75*10 ⁻⁵	1,49*10 ⁻⁴	97,37

Tabelle C 6: Approximation ab dem 1. LW – DSV (ATS 0/32 CS)

T [° C]	f [Hz]	σ_{ax} [MPa]	Probe- körper	max LW	ε_0	a	k	b	c	R ²
30	10	0,15	T43	99.499	-2,4375	1,4579	0,1607	0	0	98,91
		0,3	T221	99.499	-6,0026	4,3869	0,1170	0	0	98,87
			T1231	99.499	-6,5320	5,4191	0,1239	0	0	99,58
		0,45	T242	99.499	-6,2797	5,0498	0,1052	0	0	99,48
	5	0,15	T61	99.499	-7,4558	5,6951	0,0959	0	0	98,37
		0,3	T42	99.499	-16,0895	13,97	0,0629	0	0	98,83
			T1221	99.499	-13,32	10,9754	0,1115	0	0	99,54
		0,45	T252	99.499	-11,3301	9,5650	0,0840	0	0	99,28
	3,33	0,15	T52	99.499	-29,0173	27,1326	0,0286	0	0	97,60
		0,3	T63	99.499	-14,1210	12,1598	0,069	0	0	98,97
			T1233	99.499	-10,5304	8,4477	0,1457	0	0	99,84
		0,45	T213	99.499	-17,1058	14,9615	0,0706	0	0	99,35
40	10	0,15	T71	99.499	-8,4501	6,6690	0,0958	0	0	99,03
		0,3	T222	99.499	-10,5670	9,2715	0,0787	0	0	99,60
			T1783	99.499	-4,5663	4,2087	0,1765	3,405	-5,93*10 ⁻⁵	99,99
		0,45	T212	99.499	-15,1267	13,5210	0,0787	0	0	99,65
	5	0,15	T72	99.499	-25,8212	24,1426	0,0329	0	0	98,62
		0,3	T73	99.499	-9,7517	7,6134	0,1468	0,0761	3,65*10 ⁻⁵	99,85
			T1471	99.499	-17,3401	16,5344	0,1042	4,2749	1,46*10 ⁻⁵	99,96
		0,45	T251	99.499	-2,3029	3,1072	0,1996	1,5896	2,5*10 ⁻⁵	99,92
	3,33		T1223	33.999	4,5362	0,5211	0,4496	0,1	2,0*10 ⁻⁴	99,33
		0,15	T93	99.499	-21,8417	19,8886	0,0502	0	0	99,33
		0,3	T82	99.499	-16,1485	15,0997	0,0791	4,3502	1,06*10 ⁻⁵	99,96
			T1472	99.499	-16,3484	16,1050	0,0874	7,3502	1,06*10 ⁻⁵	99,97
	3,33	0,45	T83	75.999	-62,3841	58,7870	0,0377	7,3502	2,85*10 ⁻⁵	99,80
			T1093	27.999	-485,3097	475,8123	0,01	3,2143	1,31*10 ⁻⁴	98,97
50	10	0,15	T1741	22.499	-3,0652	2,8622	0,1923	0	0	99,96
		0,3	T312	99.499	-20,4504	20,0406	0,0519	2,3880	9,85*10 ⁻⁶	99,95
			T1473	52.499	-486,6785	474,4183	0,0103	0,2074	1,27*10 ⁻⁴	97,54
		0,45	T1742	22.499	3,8267	0,5934	0,4448	0,29742	2,3177*10 ⁻⁴	99,67
	5	0,15	T1743	25.999	-8,5813	8,2904	0,1387	0	0	99,83
		0,3	T301	93.499	-591,887	585,473	0,0048	0,7519	4,90*10 ⁻⁵	98,80
			T1091	34.999	-593,8314	583,5249	0,0094	1,6808	1,20*10 ⁻⁴	98,4
		0,45	T1753	8.199	1,2159	2,1165	0,3899	7,53*10 ⁻³	1,20*10 ⁻³	99,15
	3,33	0,15	T1751	19.999	-6,5241	6,7617	0,1544	0	0	99,82
		0,3	T302	99.499	-13,6412	15,8623	0,0688	3,1069	2,22*10 ⁻⁵	99,80
			T1782	29.999	-580,8157	576,3305	0,006	1,3738	1,47*10 ⁻⁴	98,87
		0,45	T1752	7.899	6,9691	0,3150	0,5863	3,871*10 ⁻³	1,1*10 ⁻³	99,35

Tabelle D1: Versuchsprogramm, Eigenschaften der Probekörper, Versuchsergebnisse – DSEV (AB 0/11S)

Versuchsprogramm				Eigenschaften der Probekörper			Versuchsergebnisse						
T	f	σ_{ax}	Bez. PK	ρ_A	H _{bit}	k	ε_{ax} nach 16.000 LW	ε_{ax} nach 100.000 LW	$\dot{\varepsilon}_{ax}$ nach 16.000 LW	$\hat{\varepsilon}_{ax}$	Steifemodul	Φ	Φ
[°C]	[Hz]	[MPa]		[g/cm³]	[Vol.-%]	[%]	[%]	[%]	[%/LW]	[%]	[MPa]	[°]	[ms]
30	10	0,3	AB23	2,394	3,5	99,7	7,230	8,897	0,0000914	0,5026	557,04	36,02	10,00
			AB10	2,407	2,9	100,3	7,640	8,991	0,0000760	0,4874	574,17	36,15	10,04
			AB115	2,405	3,0	100,2	7,510	8,675	0,0000660	0,4731	591,30	34,98	9,72
			AB177	2,398	3,3	99,9	8,730	10,661	0,0001025	0,3949	708,97	37,22	10,34
		0,6	AB7	2,405	3,0	100,2	12,063	13,879	0,0001067	0,7723	750,25	32,17	8,94
			AB81	2,406	3,0	100,2	12,950	14,869	0,0001165	0,7811	741,83	32,83	9,12
			AB88	2,405	3,0	100,2	16,790	18,928	0,0001202	1,0055	874,19	31,69	8,80
			AB34	2,405	3,0	100,2	14,460	16,561	0,0001299	1,0204	861,37	30,99	8,61
	5	0,9	AB68	2,405	3,0	100,2	14,810	16,997	0,0001289	0,9849	892,50	28,73	7,98
			AB56	2,414	2,6	100,6	8,580	9,740	0,0000593	-	-	-	-
			AB9	2,409	2,9	100,3	6,730	7,700	0,0000459	-	-	-	-
			AB107	2,407	2,9	100,3	22,984	24,735	0,0001071	0,3991	702,79	23,49	13,05
		0,3	AB176	2,406	3,0	100,2	10,753	12,515	0,0001015	0,3843	729,68	23,20	12,89
			AB55	2,413	2,7	100,5	11,200	12,600	0,0000700	-	-	-	-
			AB46	2,408	2,9	100,3	14,700	16,200	0,0000767	-	-	-	-
			AB156	2,417	2,5	100,7	13,710	15,469	0,0000937	0,6417	904,40	20,60	11,44
3,33	0,6	AB171	2,414	2,7	100,6	12,630	14,572	0,0001216	0,5817	997,83	20,34	11,30	
		AB173	2,418	2,5	100,7	15,110	17,007	0,0001166	0,7491	1175,01	19,47	10,81	
		AB207	2,403	3,1	100,1	18,080	20,407	0,0001351	0,8873	991,93	19,31	10,73	
		AB54	2,412	2,7	100,5	16,100	18,200	0,0000991	-	-	-	-	
	0,9	AB45	2,408	2,9	100,3	17,400	19,500	0,0000928	-	-	-	-	
		AB44	2,412	2,8	100,5	8,700	9,720	0,0000579	-	-	-	-	
		AB53	2,408	2,9	100,3	7,880	8,600	0,0000491	-	-	-	-	
		AB6	2,406	3,0	100,2	9,270	10,505	0,0000682	0,5433	516,43	20,56	17,13	
0,3	0,3	AB172	2,411	2,8	100,4	14,910	16,298	0,0000847	0,3913	717,14	22,08	18,40	
		AB208	2,397	3,3	99,9	12,092	13,109	0,0000655	0,3984	704,30	23,08	19,23	
		AB209	2,395	3,4	99,8	13,864	14,958	0,0000657	0,4659	601,95	23,58	19,65	
		AB59	2,412	2,8	100,5	14,600	16,300	0,0000905	-	-	-	-	
	0,6	AB57	2,408	2,9	100,3	13,000	14,400	0,0000680	-	-	-	-	
		AB111	2,406	3,0	100,2	13,900	15,431	0,0000911	0,8917	650,85	18,26	15,22	
		AB64	2,410	2,8	100,4	13,950	15,452	0,0000886	0,8996	645,82	17,46	14,55	
		AB60	2,412	2,8	100,5	18,300	20,500	0,0001038	-	-	-	-	
0,9		AB175	2,410	2,8	100,4	20,235	22,247	0,0001217	0,7916	1112,60	16,14	13,45	

■ Versuche wurden an der umgerüsteten Triaxialprüfmaschine durchgeführt

Tabelle D1 (fortgesetzt)

Versuchsprogramm				Eigenschaften der Probekörper			Versuchsergebnisse						
T	f	σ_{ax}	Bez. PK	ρ_A	H _{bit}	k	ε_{ax} nach 16.000 LW	ε_{ax} nach 100.000 LW	$\dot{\varepsilon}_{ax}$ nach 16.000 LW	$\hat{\varepsilon}_{ax}$	Steifemodul	Φ	Φ
[°C]	[Hz]	[MPa]		[g/cm³]	[Vol.-%]	[%]	[%]	[%]	[%/LW]	[%]	[MPa]	[°]	[ms]
30		0,9	AB95	2,406	3,0	100,2	19,820	21,742	0,0001036	1,1409	772,60	17,13	14,28
			AB210	2,402	3,1	100,1	19,498	21,367	0,0001050	0,8085	1089,32	16,75	13,96
			AB134	2,413	2,7	100,5	13,600	14,790	0,0000729	0,4586	610,08	37,82	10,51
			ABIV	2,410	2,8	100,4	11,520	12,540	0,0000613	0,4059	689,48	38,86	10,79
			AB144	2,408	2,9	100,3	9,390	10,320	0,0000569	0,3978	703,80	39,33	10,92
10		0,3	AB142	2,408	2,9	100,3	10,190	11,170	0,0000615	0,4031	694,31	39,47	10,96
			ABIII	2,410	2,8	100,4	17,930	19,620	0,0000923	0,7369	786,30	34,28	9,52
			AB141	2,406	3,0	100,2	17,120	18,990	0,0000923	0,7165	808,70	36,42	10,12
			AB153	2,410	2,8	100,4	17,630	19,180	0,0000898	0,6566	882,46	35,77	9,94
			AB145	2,407	2,9	100,3	15,470	16,980	0,0000855	0,7160	809,49	35,99	10,00
40		0,9	AB143	2,406	3,0	100,2	19,580	21,800	0,0001108	0,9265	948,84	35,58	9,88
			AB146	2,415	2,6	100,6	21,160	23,410	0,0001127	0,9596	915,86	34,99	9,72
			AB147	2,412	2,7	100,5	24,120	26,560	0,0001205	0,9199	955,56	35,01	9,72
			ABV	2,406	3,0	100,2	15,700	17,100	0,0000764	0,4808	583,16	27,83	15,46
			AB127	2,408	2,9	100,3	9,570	10,350	0,0000493	0,4113	681,54	29,89	16,61
5		0,3	AB128	2,412	2,7	100,5	10,820	11,790	0,0000624	0,4172	671,87	28,67	15,93
			ABI	2,408	2,9	100,3	27,500	29,700	0,0001081	0,8412	689,88	24,67	13,71
			AB129	2,410	2,8	100,4	14,610	16,260	0,0000840	0,7626	760,86	25,60	14,22
			AB148	2,407	2,9	100,3	19,450	21,650	0,0001119	0,7498	773,83	25,81	14,34
			AB133	2,414	2,6	100,6	26,750	29,670	0,0001412	1,1027	798,09	23,28	12,93
3,33		0,9	ABII	2,411	2,8	100,4	19,880	22,300	0,0001112	0,9597	917,05	24,96	13,86
			AB149	2,413	2,7	100,5	23,480	25,980	0,0001147	0,9837	894,62	25,10	13,94
			AB126	2,410	2,8	100,4	15,100	16,150	0,0000601	0,4983	562,74	23,68	19,73
			AB131	2,408	2,9	100,3	12,780	13,790	0,0000602	0,4635	605,13	24,32	20,27
			AB150	2,412	2,7	100,5	15,080	16,230	0,0000696	0,4161	674,37	26,42	22,02
0,6		0,6	AB135	2,410	2,8	100,4	21,790	23,800	0,0001030	0,8058	720,31	21,33	17,77
			AB140	2,409	2,9	100,3	18,180	20,380	0,0001036	0,8561	677,95	22,13	18,44
			AB174	2,410	2,8	100,4	22,500	24,740	0,0001269	0,7971	728,91	17,46	20,95
			AB132	2,411	2,8	100,4	28,500	32,150	0,0001553	1,1708	752,19	19,65	16,38
			AB130	2,409	2,9	100,4	23,730	26,760	0,0001293	1,1164	788,96	20,96	17,47
40		0,9	AB159	2,413	2,7	100,5	28,870	31,250	0,0001438	1,0924	806,25	19,90	16,59

Tabelle D1 (fortgesetzt)

Versuchsprogramm				Eigenschaften der Probekörper				Versuchsergebnisse					
T	f	σ_{ax}	Bez. PK	ρ_A	H _{bit}	k	ε_{ax} nach 16.000 LW	ε_{ax} nach 100.000 LW	$\dot{\varepsilon}_{ax}$ nach 16.000 LW	$\hat{\varepsilon}_{ax}$	Steifemodul	Φ	Φ
[°C]	[Hz]	[MPa]		[g/cm ³]	[Vol.-%]	[%]	[%]	[%]	[%/LW]	[%]	[MPa]	[°]	[ms]
50	10	0,3	AB79	2,405	3,0	100,2	12,470	14,058	0,0000791	0,6165	453,57	41,13	11,42
			AB112	2,405	3,0	100,2	11,530	12,710	0,0000603	0,6162	453,97	42,12	11,70
			AB115	2,405	3,0	100,2	7,510	8,680	0,0000660	0,4731	591,30	34,98	9,72
		0,6	AB104	2,405	3,0	100,2	18,200	21,440	0,0001246	1,1020	525,64	36,09	10,03
			AB87	2,404	3,0	100,2	24,090	27,090	0,0001223	1,1489	504,20	35,83	9,95
			AB84	2,401	3,2	100,0	22,570	25,290	0,0001166	0,9603	603,25	36,72	10,20
	0,9	AB206	2,406	3,0	100,2	17,910	20,270	0,0000956	0,8936	648,36	35,79	9,94	
		AB67	2,404	3,0	100,2	32,150	36,660	0,0001768	1,5505	566,80	34,44	9,57	
		AB92	2,404	3,1	100,2	25,850	30,350	0,0001678	1,5229	577,11	34,24	9,51	
	5	0,3	AB122	2,401	3,2	100,0	26,000	30,370	0,0001646	1,2894	681,83	34,19	9,50
			AB94	2,404	3,1	100,1	18,440	20,790	0,0000810	-	-	30,08	16,71
			AB123	2,404	3,1	100,1	10,710	11,840	0,0000623	0,5441	519,65	28,93	16,07
0,6		AB124	2,401	3,2	100,0	16,100	17,930	0,0000856	0,6532	432,72	29,31	16,29	
		AB119	2,403	3,1	100,1	17,710	20,700	0,0001188	0,9757	595,54	25,43	14,13	
		AB93	2,403	3,1	100,1	18,500	21,610	0,0001219	1,0244	567,19	24,90	13,83	
3,33	0,9	AB43	2,403	3,1	100,1	20,530	23,250	0,0001191	1,0423	557,43	24,94	13,86	
		AB114	2,403	3,1	100,1	27,510	32,140	0,0001752	1,3254	666,60	24,10	13,39	
		AB120	2,400	3,2	100,0	24,320	29,840	0,0001957	1,3539	652,55	23,93	13,29	
	0,3	AB117	2,403	3,1	100,1	23,670	28,380	0,0001775	1,3361	661,27	23,35	12,97	
		AB97	2,394	3,5	99,7	12,350	13,770	0,0000754	0,6232	450,23	24,86	20,72	
		AB24	2,394	3,5	99,7	14,700	16,290	0,0000760	0,6437	435,88	26,25	21,88	
	0,6	AB98	2,392	3,5	99,7	11,097	13,460	0,0000944	1,0962	255,93	23,02	19,18	
		AB70	2,398	3,3	99,9	19,770	23,340	0,0001398	1,0830	536,46	21,19	17,66	
		AB22	2,397	3,3	99,9	18,790	21,620	0,0001143	1,0234	567,72	21,22	17,68	
	0,9	AB83	2,399	3,3	99,9	20,680	24,010	0,0001369	1,1090	523,91	20,42	17,02	
		AB72	2,399	3,3	99,9	29,540	36,200	0,0002385	1,4799	595,59	18,97	15,81	
		AB69	2,399	3,3	99,9	24,300	29,800	0,0001993	1,4506	607,65	18,49	15,41	
			AB86	2,400	3,2	100,0	25,100	31,050	0,0002179	1,4465	609,34	18,89	15,74

Tabelle D2: Versuchsprogramm, Eigenschaften der Probekörper, Versuchsergebnisse – DSEV (SMA 0/11S, SMA I)

Versuchsprogramm				Eigenschaften der Probekörper			Versuchsergebnisse						
T	f	σ_{ax}	Bez. PK	ρ_A	H _{bit}	k	ε_{ax} nach 16.000 LW	ε_{ax} nach 100.000 LW	$\dot{\varepsilon}_{ax}$ nach 16.000 LW	$\hat{\varepsilon}_{ax}$	Steifemodul	Φ	Φ
[°C]	[Hz]	[MPa]		[g/cm³]	[Vol.-%]	[%]	[%]	[%]	[%/LW]	[%]	[MPa]	[°]	[ms]
50	10	0,3	S49	2,526	3,2	100,0	6,797	7,690	0,0000377	0,2915	916,92	18,57	5,16
			S50	2,532	2,9	100,2	8,190	9,250	0,0000485	0,3480	805,71	16,92	4,70
			S51	2,520	3,4	99,7	8,610	9,899	0,0000545	0,2936	952,01	17,75	4,93
			S206n	2,497	4,3	98,8	11,869	13,011	0,0000542	0,5715	489,33	37,91	10,53
		l5	2,537	2,7	100,4	14,170	15,890	0,0000726	0,4471	1238,93	13,14	3,65	
		S20	2,521	3,3	99,8	11,670	13,060	0,0000618	0,5310	1043,47	15,96	4,43	
		S175	2,523	3,3	99,8	13,490	15,350	0,0000779	1,1471	514,41	10,75	2,99	
		S217	2,500	4,2	98,9	17,180	19,470	0,0000802	0,8967	645,98	32,69	9,08	
	S52	2,545	2,4	100,7	15,640	18,030	0,0000930	0,6151	1444,92	14,81	4,11		
	S53	2,537	2,7	100,4	19,800	22,690	0,0001133	0,7176	1238,67	14,09	3,91		
	S54	2,529	3,0	100,1	18,440	21,500	0,0001223	0,7449	1194,86	12,79	3,55		
	S214n	2,517	3,5	99,6	19,192	21,840	0,0000891	1,1207	784,23	30,85	8,57		
	S55	2,530	3,0	100,1	10,640	11,810	0,0000553	0,2686	871,14	-	-		
	S56	2,536	2,8	100,8	8,750	9,880	0,0000478	0,4331	551,10	-	-		
	S57	2,535	2,8	100,3	10,580	11,660	0,0000566	0,2572	960,09	-	-		
	S211	2,531	3,0	100,2	11,240	12,150	0,0000416	0,5669	468,88	10,10	5,61		
S206	2,519	3,4	99,7	11,260	12,270	0,0000438	0,5854	454,80	11,16	6,20			
S58	2,541	2,6	100,6	15,080	16,660	0,0000719	0,4640	1090,07	-	-			
S59	2,524	3,2	99,9	19,730	22,650	0,0000880	0,9440	626,85	-	-			
S60	2,530	3,0	100,1	15,460	17,760	0,0000896	0,9015	647,09	0,12	0,07			
S207n	2,510	3,7	99,4	16,560	18,590	0,0000741	0,9086	638,66	22,92	12,73			
S215n	2,512	3,7	99,4	24,860	28,290	0,0001091	0,9595	604,74	22,12	12,29			
S37	2,525	3,2	99,9	18,680	21,330	0,0000959	1,1482	748,95	-	-			
S38	2,529	3,0	100,1	17,370	20,360	0,0001122	1,3544	625,89	-	-			
S39	2,529	3,0	100,1	17,140	19,690	0,0001030	1,3322	634,42	-	-			
S207	2,523	3,3	99,9	16,200	18,600	0,0000857	1,4506	618,90	10,92	6,07			
S216	2,503	4,0	99,1	15,440	18,220	0,0000947	1,2057	730,02	20,41	11,34			
S61	2,525	3,2	99,9	9,100	10,700	0,0000560	-	-	-	-			
S62	2,538	2,7	100,4	17,110	19,260	0,0000874	0,5034	620,32	-	-			
S71	2,520	3,4	99,7	14,340	16,700	0,0000928	0,5355	569,67	-	-			
S63	2,527	3,1	100,0	13,390	15,470	0,0000404	0,3685	928,32	-	-			
S72	2,533	2,9	100,3	13,270	15,080	0,0000701	0,9425	622,91	10,23	8,52			
S83	2,535	2,8	100,3	14,500	16,330	0,0000762	1,0577	553,86	9,02	7,51			

■ Versuche wurden an der umgerüsteten Triaxialprüfmaschine durchgeführt

Tabelle D2 (fortgesetzt)

Versuchsprogramm				Eigenschaften der Probekörper			Versuchsergebnisse							
T	f	σ _{ax}	Bez. PK	ρ _a	H _{bit}	k	ε _{ax} nach 16.000 LW	ε _{ax} nach 100.000 LW	ε̇ _{ax} nach 16.000 LW	ε̇ _{ax}	Steifemodul	Φ	Φ	
[°C]	[Hz]	[MPa]		[g/cm³]	[Vol.-%]	[%]	[%]	[%]	[%/LW]	[%]	[MPa]	[°]	[ms]	
50	3,33	0,9	S73	2,533	2,9	100,3	18,370	21,150	0,0001238	0,8906	514,44	-	-	
			S84	2,534	2,9	100,3	17,430	20,130	0,0001424	0,9541	479,89	-	-	
			S210	2,518	3,4	99,7	21,150	24,220	0,0001092	1,5338	582,74	8,97	7,48	
			S64	2,527	3,1	100,0	8,390	9,596	0,0000645	0,2760	996,61	15,52	4,31	
			S65	2,523	3,2	99,9	8,120	9,104	0,0000556	0,3933	713,55	16,53	4,59	
10	0,3	S212n	2,508	3,8	99,3	99,3	11,960	13,470	0,0000690	0,5194	538,62	37,56	10,43	
		S76	2,511	3,7	99,4	99,4	11,170	12,690	0,0000710	0,8112	712,75	11,97	3,33	
		S75	2,527	3,1	100,0	100,0	12,780	13,800	0,0000570	0,8528	678,25	12,79	3,55	
		S74	2,524	3,2	99,9	99,9	19,460	21,980	0,0000989	1,2468	712,14	10,24	2,85	
		S85	2,530	3,0	100,1	100,1	15,490	17,720	0,0000894	1,3379	662,11	9,92	2,76	
40	5	0,3	S91	2,525	3,2	99,9	8,280	9,240	0,0000546	0,5555	485,62	12,43	6,91	
			S203	2,511	3,7	99,4	9,770	10,690	0,0000346	0,5815	461,11	11,00	6,11	
			S218	2,500	4,2	98,9	98,9	11,913	13,174	0,0000694	0,4893	572,91	25,87	14,37
			S89	2,534	2,9	100,3	100,3	16,150	17,960	0,0000944	0,9044	654,60	10,77	5,98
			S88	2,525	3,2	99,9	99,9	12,220	13,720	0,0000681	0,9167	638,38	10,23	5,68
3,33	0,9	S87	2,526	3,1	100,0	100,0	15,360	17,770	0,0000927	1,2580	710,42	10,06	5,59	
		S86	2,519	3,4	99,7	99,7	14,860	16,730	0,0000794	1,2400	718,54	9,76	5,42	
		S201	2,516	3,5	99,6	99,6	10,540	11,720	0,0000609	0,7876	315,42	13,88	11,57	
		S202	2,519	3,4	99,7	99,7	12,440	13,670	0,0000522	0,8827	292,43	9,33	7,77	
		S205	2,512	3,7	99,4	99,4	11,580	12,570	0,0000395	0,9250	282,29	6,89	5,74	
10	0,3	S213n	2,521	3,3	99,8	99,8	10,150	11,310	0,0000481	0,5265	532,63	25,75	21,46	
		S208	2,524	3,2	99,9	99,9	13,020	14,370	0,0000591	1,2025	493,80	7,27	6,06	
		S209	2,519	3,4	99,7	99,7	17,480	19,230	0,0000845	1,0900	545,86	7,78	6,49	
		S90	2,523	3,2	99,9	99,9	19,260	22,690	0,0001279	1,3119	678,93	10,52	8,77	
		S215	2,525	3,2	99,9	99,9	18,490	20,730	0,0000972	1,2024	740,06	10,78	8,99	
30	10	0,3	S92	2,533	2,9	100,3	8,040	9,280	0,0000676	0,4677	580,96	9,17	2,55	
			S93	2,525	3,2	99,9	99,9	5,890	7,110	0,0000616	0,4796	569,75	9,53	2,65
			S174	2,526	3,1	100,0	100,0	6,930	8,320	0,0000660	0,5746	485,14	8,52	2,37
			S173	2,529	3,0	100,1	100,1	11,462	12,833	0,0000644	0,3991	701,11	33,81	9,39
			S96	2,529	3,0	100,1	100,1	14,330	16,250	0,0001096	0,7294	793,13	11,16	3,10
2,97	8,33	2,31	S97	2,528	3,1	100,0	12,500	14,690	0,0001139	0,7795	741,68	10,71	2,97	
			S171	2,527	3,1	100,0	9,750	11,740	0,0000893	0,8185	704,05	8,33	2,31	

■ Versuche wurden an der umgerüsteten Triaxialprüfmaschine durchgeführt

Tabelle D2 (fortgesetzt)

Versuchsprogramm				Eigenschaften der Probekörper			Versuchsergebnisse						
T	f	σ_{ax}	Bez. PK	ρ_A	H _{bit}	k	ε_{ax} nach 16.000 LW	ε_{ax} nach 100.000 LW	$\dot{\varepsilon}_{ax}$ nach 16.000 LW	$\hat{\varepsilon}_{ax}$	Steifemodul	Φ	Φ
[°C]	[Hz]	[MPa]		[g/cm³]	[Vol.-%]	[%]	[‰]	[‰]	[‰/LW]	[‰]	[MPa]	[°]	[ms]
10		0,9	S94	2,533	2,9	100,2	12,840	14,940	0,0001024	1,0059	885,12	8,45	2,35
			S95	2,528	3,1	100,0	13,890	16,160	0,0001104	1,0307	860,76	9,16	2,54
			S172	2,533	2,9	100,2	13,250	15,420	0,0001085	1,0633	830,10	8,18	2,27
			S98	2,542	2,5	100,6	8,340	9,630	0,0000610	0,4652	579,17	10,38	5,77
5		0,3	S99	2,527	3,1	100,0	6,890	7,870	0,0000489	0,4364	607,43	10,52	5,85
			S167	2,531	2,9	100,2	8,760	10,070	0,0000508	0,4374	571,52	-	-
			S170	2,536	2,7	100,4	18,900	20,822	0,0000894	0,4679	599,11	22,91	12,73
			S140	2,522	3,3	99,8	13,320	14,920	0,0000757	0,7634	758,35	9,22	5,12
		0,6	S142	2,515	3,6	99,6	12,283	14,325	0,0000969	0,6858	751,12	-	-
			S151	2,522	3,3	99,8	11,420	-	0,0001059	0,8582	591,67	-	-
			S204	2,51	3,8	99,3	16,960	19,670	0,0001315	0,7385	810,41	8,18	4,55
			S144	2,541	2,6	100,6	15,550	14,53	0,0001179	1,0008	886,58	9,35	5,19
		0,9	S145	2,540	2,6	100,5	13,950	13,07	0,0000987	1,0024	891,09	9,83	5,46
			S169	2,536	2,8	100,4	13,720	12,59	0,0001189	1,0107	755,22	-	-
			S135	2,514	3,6	99,5	8,040	9,060	0,0000503	0,4782	569,88	10,78	8,98
			S146	2,543	2,5	100,6	9,350	10,590	0,0000646	0,4420	607,56	10,86	9,05
		0,3	S168	2,528	3,1	100,1	8,530	10,260	0,0000812	0,1900	729,41	-	-
			S211n	2,505	3,9	99,2	17,370	19,370	0,0000832	0,5033	557,42	21,94	18,29
			S212	2,535	2,8	100,3	15,440	17,610	0,0000817	0,3963	707,85	19,96	16,63
			S136	2,521	3,3	99,8	12,940	14,380	0,0000700	0,7766	748,61	9,44	7,87
3,33		0,6	S137	2,531	3,0	100,2	10,920	12,340	0,0000705	0,7631	765,06	8,92	7,43
			S147	2,524	3,2	99,9	13,440	15,130	0,0000880	0,7834	750,43	8,45	7,04
			S208n	2,508	3,8	99,3	20,370	22,460	0,0000992	0,8448	691,84	17,56	14,63
			S210n	nicht gewogen			14,220	16,020	0,0000821	0,7825	743,50	17,24	14,36
		0,9	S106	2,520	3,4	99,7	11,060	12,970	0,0000874	0,6738	673,78	-	-
			S134	2,507	3,9	99,2	14,470	16,360	0,0000926	0,6675	683,03	-	-
			S161	2,522	3,3	99,8	11,950	13,580	0,0000968	0,7098	644,82	-	-
			S213	2,528	3,1	100,0	14,710	16,220	0,0000773	1,0311	867,33	8,41	7,01
			S214	2,53	3,0	100,1	17,160	19,240	0,0001084	1,0952	816,25	8,58	7,15
			S209n	2,498	4,2	98,9	17,330	20,090	0,0001094	0,9965	883,68	16,17	13,47

■ Versuche wurden an der umgerüsteten Triaxialprüfmaschine durchgeführt

Tabelle D3: Versuchsprogramm, Eigenschaften der Probekörper, Versuchsergebnisse – DSEV (SMA 0/11S, SMA II)

Versuchsprogramm				Eigenschaften der Probekörper			Versuchsergebnisse						
T	f	σ_{ax}	Bez. PK	ρ_A	H _{bit}	k	ε_{ax} nach 16.000 LW	ε_{ax} nach 100.000 LW	$\dot{\varepsilon}_{ax}$ nach 16.000 LW	$\hat{\varepsilon}_{ax}$	Steifemodul	Φ	Φ
[°C]	[Hz]	[MPa]		[g/cm³]	[Vol.-%]	[%]	[%]	[%]	[%/LW]	[%]	[MPa]	[°]	[ms]
30	10	0,3	M34	2,379	2,1	102,0	14,520	16,225	0,0000921	0,5281	529,57	42,33	11,76
			M23	2,376	2,2	101,8	11,750	13,390	0,0000859	0,4713	593,65	40,73	11,31
			M32	2,356	3,0	101,0	13,280	15,204	0,0000770	0,5732	472,02	-	-
			M42	2,366	2,6	101,4	16,760	19,089	0,0001147	0,9482	610,94	35,99	10,00
		M43	2,357	3,0	101,0	15,330	17,807	0,0001084	1,0686	542,16	34,37	9,55	
		M44	2,366	2,6	101,4	16,790	19,273	0,0001117	0,9859	587,59	35,17	9,77	
		M45	2,346	3,4	100,5	15,980	18,569	0,0001145	0,9649	600,41	34,18	9,50	
		M16	2,376	2,2	101,8	17,970	20,382	0,0001215	0,8565	676,41	36,48	10,13	
		M31	2,363	2,7	101,3	21,810	24,576	0,0001227	0,9545	628,69	-	-	
		M11	2,355	3,0	100,9	21,420	25,651	0,0001700	1,2318	713,47	34,00	9,44	
		M12	2,360	2,9	101,1	21,240	24,527	0,0001448	1,1908	738,13	34,75	9,65	
		M33	2,363	2,7	101,3	20,460	23,760	0,0001317	1,2319	708,01	-	-	
		M30	2,368	2,5	101,5	23,940	27,800	0,0001587	1,3630	648,68	-	-	
		M21	2,377	2,1	101,9	7,950	9,416	0,0000658	0,6330	441,75	36,29	10,08	
		M37	2,369	2,5	101,5	12,680	14,664	0,0000810	0,5318	526,29	34,37	9,55	
50	10	0,6	M35	2,376	2,2	101,8	6,770	8,981	0,0000914	1,0029	577,54	30,26	8,40
			M36	2,373	2,3	101,7	11,520	14,003	0,0001068	0,9774	592,71	32,09	8,91
		0,9	M22	2,377	2,1	101,9	11,740	15,652	0,0001601	1,0609	828,39	28,71	7,97
			M41	2,373	2,3	101,7	18,532	21,788	0,0001442	1,0777	815,54	28,48	7,91

Tabelle D4: Versuchsprogramm, Eigenschaften der Probekörper, Versuchsergebnisse – DSEV (OPA)

Versuchsprogramm				Eigenschaften der Probekörper				Versuchsergebnisse						
T	f	σ_{ax}	Bez. PK	ρ_A	H _{bit}	k	ε_{ax} nach 16.000 LW	ε_{ax} nach 100.000 LW	$\dot{\varepsilon}_{ax}$ nach 16.000 LW	$\hat{\varepsilon}_{ax}$	Steifemodul	Φ	Φ	
[°C]	[Hz]	[MPa]		[g/cm³]	[Vol.-%]	[%]	[%]	[%]	[%/LW]	[%]	[MPa]	[°]	[ms]	
30	10	0,3	OPA80	1,850	23,3	102,6	23,190	28,335	0,0001822	0,6803	411,06	39,56	10,99	
			OPA93	1,861	22,8	103,2	12,050	15,103	0,0001231	0,6177	452,66	38,87	10,80	
		0,6	OPA63	1,846	23,5	102,4	24,850	30,366	0,0001800	1,0925	530,15	34,62	9,62	
			OPA94	1,866	22,6	103,5	22,310	27,989	0,0001934	1,1760	492,58	34,35	9,54	
	5	0,9	OPA73	1,842	23,6	102,2	26,610	33,147	0,0002207	1,5556	564,99	31,97	8,88	
			OPA104	1,852	23,2	102,7	27,600	33,827	0,0002138	1,3833	635,34	31,76	8,82	
		0,3	OPA60	1,840	23,7	102,1	18,190	22,637	0,0001425	0,7086	395,39	27,10	15,05	
			OPA99	1,877	22,2	104,1	15,130	19,056	0,0001254	0,6107	458,86	27,55	15,30	
	40	3,33	0,6	OPA62	1,861	22,9	103,2	21,710	26,725	0,0001562	1,2147	477,65	22,94	12,74
				OPA102	1,821	24,5	101,0	24,430	29,972	0,0001871	1,0797	537,41	24,12	13,40
			0,9	OPA71	1,844	23,5	102,3	28,230	35,249	0,0002300	1,6859	522,00	20,54	11,41
				OPA101	1,843	23,6	102,2	29,400	36,780	0,0002248	1,4956	588,45	20,66	11,48
10		0,3	OPA72	1,845	23,5	102,4	18,640	23,849	0,0001663	0,6835	410,18	23,54	19,61	
			OPA90	1,864	22,7	103,4	17,580	21,755	0,0001409	0,7089	395,51	23,18	19,32	
		0,6	OPA79	1,851	23,2	102,7	21,200	27,160	0,0001900	1,2038	482,11	18,68	15,56	
			OPA89	1,849	23,3	102,6	20,740	25,978	0,0001643	1,3232	438,65	18,43	15,36	
50		3,33	0,9	OPA61	1,814	24,8	100,6	24,900	33,140	0,0002315	1,6597	530,57	16,61	13,84
				OPA109	1,836	23,9	101,8	25,340	31,804	0,0001953	1,5881	554,50	16,82	14,02
			0,3	OPA44	1,869	22,5	103,7	17,110	21,860	0,0001554	0,8126	344,06	39,66	11,02
				OPA88	1,854	23,1	102,8	18,110	22,611	0,0001561	0,7517	371,92	40,63	11,29
	10	0,9	OPA59	1,722	28,6	95,5	21,630	26,930	0,0001748	1,3425	431,47	33,53	9,31	
			OPA47	1,845	23,5	102,3	28,120	34,194	0,0002021	1,3942	412,02	33,80	9,39	
		0,6	OPA83	1,850	23,3	102,6	22,320	27,776	0,0001707	1,1883	487,50	34,75	9,65	
			OPA51	1,842	23,6	102,2	28,410	35,850	0,0002193	1,7672	497,30	30,68	8,52	
	5	0,9	OPA107	1,861	22,9	103,2	31,480	39,556	0,0002436	1,6465	533,76	30,77	8,55	
			OPA45	1,874	22,3	103,9	21,880	27,632	0,0001892	0,8754	320,04	27,71	15,40	
		0,3	OPA86	1,851	23,2	102,7	18,100	23,260	0,0001441	0,7811	358,75	28,54	15,85	
			OPA52	1,845	23,5	102,3	24,770	30,987	0,0001975	1,3957	415,69	21,76	12,09	
5	0,6	OPA96*	1,833	24,0	101,6	19,910	26,070	0,0001802	1,2901	449,73	21,49	11,94		
		OPA53	1,822	24,4	101,1	27,710	35,663	0,0002422	1,7529	502,02	19,15	10,64		
		OPA100	1,831	24,1	101,6	28,450	36,062	0,0002304	1,6756	525,17	19,63	10,91		

Tabelle D4 (fortgesetzt)

Versuchsprogramm				Eigenschaften der Probekörper				Versuchsergebnisse					
T	f	σ_{ax}	Bez. PK	ρ_A	H _{bit}	k	ε_{ax} nach 16.000 LW	$\dot{\varepsilon}_{ax}$ nach 100.000 LW	$\dot{\varepsilon}_{ax}$ nach 16.000 LW	$\hat{\varepsilon}_{ax}$	Steifemodul	Φ	Φ
[°C]	[Hz]	[MPa]		[g/cm³]	[Vol.-%]	[%]	[%]	[%]	[%/LW]	[%]	[MPa]	[°]	[ms]
30	3,33	0,3	OPA42	1,872	22,4	103,8	17,880	22,795	0,0001605	0,8730	321,14	22,02	18,35
			OPA87	1,845	23,5	102,3	20,170	25,835	0,0001752	0,8486	330,39	22,67	18,89
			OPA48	1,736	28,0	96,3	24,080	30,046	0,0001996	1,5405	376,76	15,99	13,33
	OPA110	1,837	23,9	101,9	23,880	31,305	0,0002055	1,2786	453,93	17,31	14,42		
	OPA50	1,876	22,2	104,1	28,090	35,573	0,0002412	1,7912	491,61	15,09	12,58		
	OPA111	1,842	23,6	102,1	30,800	39,227	0,0002291	1,7074	515,74	15,15	12,62		
10	0,3	OPA70	1,834	23,9	101,7	21,130	26,556	0,0001839	0,8795	317,88	38,95	10,82	
		OPA91	1,855	23,1	102,9	16,780	20,677	0,0001449	0,8382	332,27	37,02	10,28	
		OPA57	1,863	22,8	103,3	25,600	31,875	0,0001917	1,3903	416,64	33,24	9,23	
	OPA56	1,879	22,1	104,2	22,451	27,698	0,0001930	1,3656	424,13	33,57	9,32		
	OPA97	1,814	24,8	100,6	21,990	28,835	0,0001933	1,5727	366,95	32,67	9,07		
	OPA81	1,864	22,7	103,4	29,060	37,415	0,0002379	1,9288	455,59	30,78	8,55		
50	0,9	OPA93*	1,847	23,4	102,4	27,480	35,320	0,0002266	2,0041	438,49	29,77	8,27	
		OPA85	1,859	22,9	103,1	17,600	22,828	0,0001719	0,9185	305,03	25,88	14,38	
		OPA96	nicht gewogen			17,610	23,046	0,0001932	0,9598	291,90	25,63	14,24	
	5	0,6	OPA84	1,891	21,6	104,9	25,450	32,355	0,0001867	1,6280	356,36	21,17	11,76
			OPA191	1,840	23,7	102,1	26,000	35,026	0,0002440	1,6580	349,92	20,61	11,45
			OPA82	1,860	22,9	103,2	29,700	38,855	0,0002545	2,0103	437,72	18,29	10,16
3,33	0,9	OPA95	1,862	22,8	103,3	31,420	44,425	0,0003243	2,0243	434,74	18,69	10,38	
		OPA55	1,837	23,8	101,9	19,430	25,548	0,0001956	0,9437	297,05	20,77	17,31	
		OPA92	1,854	23,1	102,8	19,620	25,373	0,0001853	0,8961	312,86	19,17	15,97	
	0,6	OPA98	1,845	23,5	102,3	29,170	39,592	0,0002961	1,6822	345,00	15,99	13,32	
		OPA105	nicht gewogen			27,730	36,200	0,0002706	1,6260	356,92	16,45	13,71	
		OPA58	1,887	21,8	104,7	28,830	37,905	0,0002892	1,9294	456,39	14,29	11,91	
0,9	OPA194	1,857	23,0	103,0	32,150	46,363	0,0003648	2,0292	433,97	13,99	11,66		

Tabelle D5: Versuchsprogramm, Eigenschaften der Probekörper, Versuchsergebnisse – DSEV (ABi 0/16S)

Versuchsprogramm				Eigenschaften der Probekörper				Versuchsergebnisse					
T	f	σ_{ax}	Bez. PK	ρ_A	H _{bit}	k	ε_{ax} nach 16.000 LW	$\dot{\varepsilon}_{ax}$ nach 100.000 LW	$\dot{\varepsilon}_{ax}$ nach 16.000 LW	$\hat{\varepsilon}_{ax}$	Steife-modul	Φ	Φ
[°C]	[Hz]	[MPa]		[g/cm³]	[Vol.-%]	[%]	[%]	[%]	[%/LW]	[%]	[MPa]	[°]	[ms]
50	10	0,3	BM28	2,384	5,2	98,7	10,290	11,770	0,000742	0,5552	503,66	40,31	11,20
			BM34	2,404	4,4	99,5	9,470	10,518	0,000565	0,4662	588,56	41,54	11,54
			BM45	2,388	5,0	98,8	11,030	12,360	0,000684	0,5043	546,82	42,41	11,78
		0,6	BM26	2,399	4,6	99,3	14,800	16,900	0,000966	1,0192	568,35	35,32	9,81
			BM41	2,353	6,4	97,4	15,120	17,454	0,001058	0,8749	667,73	35,35	9,82
			BM98	2,406	4,3	99,6	16,390	18,608	0,000982	0,7973	730,77	36,44	10,12
	5	0,9	BM25	2,404	4,4	99,5	19,380	22,451	0,001215	1,3261	662,78	33,26	9,24
			BM50	2,390	4,9	98,9	18,010	20,733	0,001085	1,0983	813,85	34,54	9,59
			BM102	2,376	5,5	98,3	21,230	25,130	0,001459	1,1449	786,75	34,95	9,71
		0,3	BM23	2,408	4,2	99,6	12,090	13,321	0,000615	0,5449	514,25	27,99	15,55
			BM32	2,409	4,2	99,7	9,920	11,097	0,000647	0,4683	598,50	29,90	16,61
			BM31	2,408	4,2	99,6	15,670	18,565	0,001197	1,0887	533,01	25,05	13,91
40	3,33	0,6	BM47	2,407	4,2	99,6	14,290	16,186	0,000839	0,8791	660,02	24,97	13,87
			BM33	2,412	4,0	99,8	22,980	25,790	0,001224	1,1039	797,22	22,49	12,49
			BM42	2,348	6,6	97,2	23,050	27,394	0,001700	1,2723	691,65	22,16	12,31
		0,9	BM40	2,384	5,2	98,6	11,360	13,000	0,000764	0,6063	462,49	25,20	21,00
			BM46	2,375	5,5	98,3	10,080	11,478	0,000614	0,5458	513,82	25,53	21,28
			BM39	2,388	5,0	98,8	18,480	21,275	0,001197	0,9060	640,60	19,32	16,10
	10	0,3	BM43	2,405	4,3	99,5	14,920	17,095	0,000968	0,8624	673,08	21,10	17,58
			BM118	2,393	4,8	99,0	15,670	18,468	0,001082	0,8668	669,59	21,40	17,84
			BM48	2,390	4,9	98,9	20,090	23,450	0,001395	1,1974	735,47	18,73	15,61
		0,6	BM49	2,402	4,5	99,4	22,220	25,314	0,001301	1,1895	740,28	18,95	15,79
			BM65	2,385	5,1	98,7	17,710	22,354	0,001554	1,1844	743,52	18,44	15,37
			BM51	2,397	4,6	99,2	10,460	11,720	0,000722	0,4103	681,74	38,02	10,56
5	5	0,3	BM82	2,399	4,6	99,3	9,510	10,820	0,000730	0,4716	593,22	38,44	10,68
			BM108	2,407	4,3	99,6	10,680	12,240	0,000877	0,3933	711,16	38,94	10,82
			BM44	2,393	4,8	99,0	18,430	20,290	0,000928	0,7123	813,24	33,83	9,40
		0,6	BM57	2,364	6,0	97,8	14,170	15,990	0,000965	0,7414	781,36	32,87	9,13
			BM79	2,383	5,2	98,6	15,080	16,940	0,000913	0,6748	858,37	33,92	9,42
			BM60	2,384	5,2	98,7	16,360	19,150	0,001261	1,0365	847,89	33,58	9,33
	10	0,9	BM81	2,386	5,1	98,7	15,950	18,230	0,001051	1,0194	862,12	32,51	9,03
			BM84	2,388	5,0	98,8	18,900	21,800	0,001262	0,9796	897,16	32,83	9,12
			BM64	2,403	4,4	99,4	10,340	11,590	0,000677	0,4486	624,83	26,97	14,98
		0,3	BM71	2,403	4,4	99,4	9,530	10,830	0,000697	0,4797	584,35	26,71	14,84
			BM59	2,377	5,4	98,4	9,800	10,930	0,000625	0,4240	660,96	27,38	15,21
			BM52	2,398	4,6	99,2	12,870	14,410	0,000758	0,7591	764,37	22,29	12,38

Tabelle D5 (fortgesetzt)

Versuchsprogramm				Eigenschaften der Probekörper				Versuchsergebnisse					
T	f	σ_{ax}	Bez. PK	ρ_A	H _{bit}	k	ϵ_{ax} nach 16.000 LW	$\dot{\epsilon}_{ax}$ nach 100.000 LW	$\dot{\epsilon}_{ax}$ nach 16.000 LW	$\hat{\epsilon}_{ax}$	Steife-modul	Φ	Φ
[°C]	[Hz]	[MPa]		[g/cm³]	[Vol.-%]	[%]	[%]	[%]	[%/LW]	[%]	[MPa]	[°]	[ms]
40	5	0,6	BM58	2,365	5,9	97,8	18,080	17,480	0,0001178	0,8346	695,20	23,15	12,86
			BM114	2,403	4,4	99,4	16,910	18,560	0,0000812	0,7403	783,77	23,96	13,31
			BM67	2,407	4,2	99,6	15,280	17,140	0,0000927	0,9575	919,23	21,22	11,79
			BM76	2,401	4,5	99,3	16,400	18,810	0,0001074	1,0691	823,17	20,70	11,50
	3,33	0,9	BM115	2,409	4,2	99,7	19,600	22,130	0,0001158	0,9452	931,10	22,39	12,44
			BM88	2,393	4,8	99,0	20,400	23,540	0,0001311	0,9797	898,32	22,91	12,73
			BM77	2,395	4,7	99,1	19,900	21,223	0,0000690	0,5405	518,80	24,24	20,20
			BM63	2,403	4,4	99,4	8,050	8,972	0,0000496	0,4115	681,47	24,63	20,52
	0,6	0,3	BM53	2,393	4,8	99,0	8,570	9,463	0,0000488	0,4656	602,36	24,09	20,07
			BM78	2,378	5,4	98,4	15,400	17,511	0,0000983	0,8573	676,99	19,98	16,65
			BM75	2,413	4,0	99,8	14,250	16,319	0,0000981	0,6872	844,54	20,89	17,40
			BM54	2,397	4,7	99,2	15,430	17,310	0,0000873	0,8324	697,28	20,50	17,09
	0,9	0,9	BM69	2,405	4,3	99,5	18,930	21,277	0,0001081	1,0868	810,27	17,96	14,96
			BM83	2,386	5,1	98,8	19,630	23,745	0,0001557	1,0937	805,16	19,62	16,35
30	10	0,3	BM72	2,390	4,9	98,9	16,610	19,464	0,0001195	0,9438	933,10	18,27	15,23
			BM11	2,378	5,4	98,4	7,301	8,850	0,0000745	0,3796	737,28	36,30	10,08
			BM12	2,385	5,1	98,7	7,060	8,290	0,0000564	0,3485	802,53	34,66	9,63
			BM109	2,413	4,0	99,8	6,290	7,630	0,0000636	0,3821	732,03	35,58	9,88
	0,6	0,6	BM9	2,382	5,2	98,6	13,490	15,590	0,0000961	0,5824	994,87	31,84	8,85
			BM10	2,372	5,7	98,1	10,470	12,700	0,0001053	0,5639	1027,44	31,63	8,79
			BM111	2,394	4,8	99,1	18,280	20,540	0,0001099	0,5719	1012,95	30,45	8,46
			BM1	2,386	5,1	98,7	11,430	14,196	0,0001252	0,6929	1268,34	31,14	8,65
	5	0,9	BM2	2,414	4,0	99,9	11,640	13,970	0,0001043	0,7368	1192,78	31,15	8,65
			BM100	2,389	5,0	98,8	10,470	12,900	0,0001046	0,7692	1142,65	30,05	8,35
			BM15	2,406	4,3	99,5	12,570	13,950	0,0000683	0,3729	752,04	24,70	13,72
			BM17	2,404	4,4	99,5	9,630	10,880	0,0000600	0,3461	809,77	23,56	13,09
	0,3	0,3	BM110	2,402	4,5	99,4	7,860	9,660	0,0001046	0,3572	784,86	25,08	13,93
			BM14	2,415	4,0	99,9	9,900	12,480	0,0000933	0,5830	995,22	20,46	11,37
			BM19	2,380	5,3	98,5	11,960	14,580	0,0000984	0,6029	962,41	21,87	12,15
			BM103	2,368	5,8	98,0	10,930	13,300	0,0001077	0,6245	929,19	22,95	12,75
3,33	0,9	0,9	BM13	2,406	4,3	99,6	31,580	34,160	0,0001209	0,7487	1175,53	19,88	11,04
			BM27	2,395	4,7	99,1	12,090	15,110	0,0001171	0,9146	962,25	19,98	11,10
			BM107	2,417	3,9	100,0	12,340	14,810	0,0001113	0,7907	1113,03	19,57	10,87
			BM20	2,384	5,2	98,6	8,919	10,390	0,0000767	0,3831	732,66	22,06	18,38
	0,3	0,3	BM24	2,410	4,1	99,7	13,598	14,980	0,0000700	0,4418	634,72	19,91	16,59
			BM97	2,411	4,1	99,7	12,660	13,940	0,0000640	0,3661	766,23	22,02	18,35

Tabelle D5 (fortgesetzt)

Versuchsprogramm				Eigenschaften der Probekörper				Versuchsergebnisse				
T	f	σ_{ax}	Bez. PK	ρ_A	H _{bit}	k		ϵ_{ax} nach 16.000 LW	$\dot{\epsilon}_{ax}$ nach 16.000 LW	$\hat{\epsilon}_{ax}$	Steife-modul	ϕ
[°C]	[Hz]	[MPa]		[g/cm³]	[Vol.-%]	[%]		[‰]	[‰/LW]	[‰]	[MPa]	[°]
30		0,6	BM18	2,405	4,3	99,5		10,910	12,980	0,6121	948,17	18,16
			BM22	2,406	4,3	99,6		8,930	10,540	0,6799	853,76	16,90
			BM87	2,394	4,8	99,1		17,940	20,360	0,6212	934,48	18,29
			BM16	2,410	4,1	99,7		15,940	18,060	0,8175	1076,99	16,82
			BM21	2,408	4,2	99,6		10,860	13,370	0,8790	1001,58	15,38
	3,33	0,9	BM86	2,402	4,5	99,4		14,320	17,030	0,7976	1104,11	16,65

Tabelle D6: Versuchsprogramm, Eigenschaften der Probekörper, Versuchsergebnisse – DSEV (ATS 0/32)

Versuchsprogramm				Eigenschaften der Probekörper				Versuchsergebnisse				
T	f	σ_{ax}	Bez. PK	ρ_A	H _{bit}	k		ϵ_{ax} nach 16.000 LW	$\dot{\epsilon}_{ax}$ nach 16.000 LW	$\hat{\epsilon}_{ax}$	Steife-modul	ϕ
[°C]	[Hz]	[MPa]		[g/cm³]	[Vol.-%]	[%]		[‰]	[‰/LW]	[‰]	[MPa]	[°]
50	10	0,3	T70	2,355	7,4	98,5		9,400	11,312	0,3895	717,85	45,86
			T119	2,376	6,6	99,4		9,830	11,611	0,3368	830,27	44,72
			T75	2,383	6,4	99,6		15,080	18,699	0,6234	929,34	39,58
		0,6	T125	2,368	6,9	99,1		15,230	19,131	0,5448	1063,44	39,63
			T78	2,384	6,3	99,7		21,490	27,579	0,8577	1024,81	36,09
			T106	2,372	6,8	99,2		22,090	30,496	0,7670	1146,01	37,38
	5	0,3	T133	2,378	6,6	99,5		9,755	11,828	0,3528	794,34	32,40
			T131	2,385	6,3	99,7		10,234	12,076	0,3296	850,34	32,47
			T93	2,382	6,4	99,6		12,120	14,127	0,4400	636,82	31,57
		0,6	T79	2,356	7,4	98,6		18,760	23,504	0,7277	797,36	26,17
			T105	2,376	6,6	99,4		17,080	23,510	0,5989	969,07	27,27
			T76	2,373	6,8	99,2		21,830	29,770	0,9017	976,11	25,33
40	3,33	0,9	T116	2,364	7,1	98,9		23,560	30,403	0,7815	1126,15	24,85
			T77	2,344	7,9	98,0		8,290	10,038	0,4510	621,57	25,80
			T120	2,381	6,4	99,6		10,070	13,577	0,4176	671,56	28,22
		0,6	T74	2,365	7,1	98,9		16,830	22,284	0,7456	778,44	22,66
			T124	2,359	7,3	98,6		21,930	29,140	0,6746	860,59	23,45
			T73	2,379	6,5	99,5		24,000	33,739	0,9908	888,95	20,22
	10	0,9	T132	2,376	6,6	99,4		22,710	30,140	0,8122	1084,49	20,27
			T37	2,436	4,3	101,9		5,490	6,475	0,2658	1052,28	41,74
			T110	2,369	6,9	99,1		8,580	10,145	0,2398	1166,14	40,84
		0,6	T38	2,440	4,1	102,1		10,910	12,785	0,4753	1218,84	36,81
			T114	2,306	9,4	96,4		12,950	14,797	0,3836	1510,06	36,22
			T82	2,382	6,4	99,6		17,480	21,217	0,7149	1229,53	35,59

Tabelle D6 (fortgesetzt)

Versuchsprogramm				Eigenschaften der Probekörper				Versuchsergebnisse					
T	f	σ_{ax}	Bez. PK	ρ_A	H _{bit}	k		ϵ_{ax} nach 16.000 LW	ϵ_{ax} nach 100.000 LW	$\dot{\epsilon}_{ax}$ nach 16.000 LW	$\hat{\epsilon}_{ax}$	Steife-modul	Φ
[°C]	[Hz]	[MPa]		[g/cm³]	[Vol.-%]	[%]		[%]	[%]	[%/LW]	[‰]	[MPa]	[°]
40	10	0,9	T113	2,380	6,5	99,5		18,210	21,626	0,0001264	0,5237	1678,13	34,88
	5	0,3	T96	2,386	6,3	99,8		6,500	7,949	0,0000561	0,3124	897,25	30,60
			T108	2,368	7,0	99,0		9,530	11,004	0,0000620	0,2570	1090,73	31,18
			T63	2,380	6,5	99,6		12,300	15,230	0,0000987	0,6202	935,50	27,80
			T130a	2,367	7,0	99,0		12,770	15,452	0,0000940	0,4360	1331,10	27,84
	5	0,6	T127	2,331	8,4	97,5		14,630	17,851	0,0001123	0,4552	1274,77	26,27
			T60	2,38	6,5	99,5		18,850	23,180	0,0001414	0,8075	1089,79	25,06
			T71	2,368	7,0	99,0		18,400	22,814	0,0001435	0,7743	1136,48	24,46
			T161	1,988	21,9	83,1		18,130	24,420	0,0001773	0,6173	1426,08	24,66
	3,33	0,3	T61	2,367	7,0	99,0		7,380	9,030	0,0000671	0,4654	602,49	35,15
			T103	2,369	6,9	99,1		9,530	11,111	0,0000657	0,3571	785,23	25,97
			T158	2,362	7,2	98,8		8,090	9,550	0,0000575	0,3006	932,73	26,21
			T64	2,376	6,7	99,4		16,720	20,650	0,0001347	0,7458	778,24	24,54
	3,33	0,6	T94	2,382	6,4	99,6		13,320	16,112	0,0000931	0,6106	950,56	23,17
			T162	2,368	7,0	99,0		13,410	17,400	0,0001247	0,5275	1100,59	22,45
			T62	2,387	6,2	99,8		16,800	21,720	0,0001638	0,8781	1002,85	22,30
			T92	2,388	6,2	99,9		17,700	22,360	0,0001329	0,8020	1098,06	20,61
30	10	0,9	T157	2,373	6,7	99,3		19,590	25,550	0,0001816	0,6527	1349,50	20,71
			T115	2,375	6,7	99,3		5,910	8,078	0,0000845	0,2165	1292,18	35,52
			T156	2,380	6,5	99,5		4,710	6,073	0,0000830	0,1851	1512,02	35,59
			T129	2,375	6,7	99,3		8,900	11,489	0,0000973	0,4259	1360,62	31,98
	5	0,6	T155	2,378	6,6	99,5		8,130	10,891	0,0001073	0,3270	1771,80	30,86
			T99	2,386	6,2	99,8		10,280	12,884	0,0000995	0,5495	1599,48	29,81
			T165	2,379	6,5	99,5		11,420	14,360	0,0001122	0,4970	1768,80	30,00
			T129a	2,369	6,9	99,1		7,750	9,271	0,0000628	0,2097	1337,19	23,23
	3,33	0,3	T163	2,354	7,5	98,4		6,720	8,259	0,0000680	0,2384	1176,66	25,69
			T130	2,378	6,6	99,5		8,660	10,304	0,0000676	0,4229	1372,11	21,26
			T159	2,356	7,4	98,5		10,290	12,672	0,0000910	0,3817	1520,36	22,09
			T128	2,370	6,9	99,1		11,410	14,138	0,0001072	0,5616	1567,00	20,36
	5	0,9	T164	2,372	6,8	99,2		13,050	16,865	0,0001288	0,5011	1756,57	20,67
			T117	2,381	6,4	99,6		9,220	10,632	0,0000604	0,2372	1182,44	20,04
			T153	2,376	6,6	99,4		5,710	7,117	0,0000538	0,2241	1251,61	21,42
			T126	2,360	7,3	98,7		18,250	21,084	0,0001070	0,4620	1256,35	18,56
30	3,33	0,6	T154	2,379	6,5	99,5		10,680	12,864	0,0000832	0,3468	1673,92	18,41
			T100	2,381	6,4	99,6		14,460	18,100	0,0001281	0,5874	1499,28	18,39
30	3,33	0,9	T160	2,377	6,6	99,4		12,990	16,533	0,0001227	0,5966	1476,13	17,68
													14,73

Tabelle E 1: Approximation vom 1. bis zum 100.000 LW – DSEV (AB 0/11 S) – 30 °C

T [°C]	f [Hz]	σ _{ax} [MPa]	Probe- körper	Gleichung 4-18				Gleichung 4-17				Gleichung 4-19					
				ε ₀	a	k	R ²	S _{app} /S _{orig.}	a	k	R ²	S _{app} /S _{orig.}	A1	A2	A3	R ²	S _{app} /S _{orig.}
30	10	0,3	AB23	-11,005	10,295	0,0611	99,15	1,76	1,4092	0,1708	96,85	2,36	1,1235	0,0856	0,0648	98,42	1,77
			AB10	-25,133	24,252	0,0309	99,08	1,83	1,5971	0,1575	95,81	2,61	1,0749	0,0267	0,0415	98,99	1,87
			AB115	-171,61	170,85	0,0049	99,12	1,49	1,8319	0,1423	95,43	2,23	1,1022	0,0370	0,0331	99,06	1,54
			AB177	-8,9462	8,6035	0,0741	99,30	1,79	1,6557	0,1685	97,65	2,30	1,1026	0,0094	0,0561	99,16	1,85
			AB7	-74,639	73,574	0,0168	98,80	1,94	2,8294	0,1457	95,27	2,81	1,1616	0,0682	0,0486	98,60	2,03
	5	0,6	AB81	-82,236	80,734	0,0169	98,58	2,11	2,9055	0,1498	94,79	3,07	1,1495	0,0769	0,0517	98,32	2,23
			AB88	-435,5	434,88	0,004	98,61	1,83	4,6193	0,1298	93,82	2,63	1,2700	0,0207	0,0374	97,76	1,52
			AB34	-121,48	120,17	0,0126	98,77	1,68	3,4468	0,1438	95,08	2,46	1,2031	0,0939	0,0534	98,48	1,79
			AB68	-495,72	493,98	0,0034	98,73	1,68	3,5267	0,1441	95,05	2,54	1,2075	0,0978	0,0544	98,44	1,87
			AB56	-308,4562	307,1514	0,0032	98,01	2,14	2,1711	0,1348	93,22	2,88	0,9193	0,0990	0,0146	98,58	1,85
3,33	0,3	AB9	-290,1478	289,1964	0,0026	98,09	2,20	1,7484	0,1331	93,43	2,95	0,9434	0,0825	0,0063	98,68	1,89	
		AB107	-1133,791	1138,6124	0,0016	92,07	2,45	9,4066	0,0887	84,35	3,03	1,4394	0,4711	0,02	97,66	1,66	
		AB176	-47,3051	46,3574	0,0227	99,20	1,79	2,3858	0,1492	95,90	2,56	1,0619	0,0498	0,0450	99,07	1,85	
		AB55	-409,5207	409,7367	0,0026	97,28	1,62	3,6252	0,1113	92,61	2,06	0,9796	0,1546	0,0094	98,66	1,31	
		AB46	-525,0700	526,1064	0,0026	95,86	1,85	5,1216	0,1038	90,77	2,30	0,9950	0,2203	0,0155	97,91	1,47	
	0,9	AB156	-430,6297	429,6216	0,0035	98,70	1,93	3,6386	0,1335	92,82	2,77	1,0606	0,1247	0,0381	98,77	1,8	
		AB171	-439,6982	437,0267	0,0035	98,76	2,11	2,5977	0,1581	94,26	3,27	0,9991	0,0767	0,0496	98,52	2,31	
		AB173	-540,0039	538,2831	0,0031	98,53	2,17	3,7356	0,1398	92,78	3,18	1,0434	0,1291	0,0456	98,32	2,14	
		AB54	-478,1701	478,4232	0,0033	97,95	1,5	5,1688	0,1126	93,67	1,93	1,0008	0,2067	0,03	98,86	1,3	
		AB207	-593,3812	591,6327	0,0033	98,83	2,08	4,4643	0,1378	93,17	3,03	1,0680	0,1622	0,0510	98,57	2,09	
0,6	AB45	-532,8017	534,3674	0,0029	97,18	1,40	6,1832	0,1025	92,79	1,76	1,0586	0,2518	0,03	98,69	1,17		
	AB44	-390,8382	390,1405	0,0024	97,31	2,56	2,4527	0,1240	92,25	3,35	0,8858	0,1155	0,0061	98,37	2,12		
	AB53	-294,1240	294,1971	0,0026	95,78	2,27	2,5090	0,1114	90,36	2,86	0,9070	0,1322	-0,0119	97,89	1,75		
	AB6	-248,3075	247,9236	0,0039	98,87	1,94	2,5417	0,1305	94,07	2,79	1,0365	0,0678	0,0274	98,89	1,84		
	AB172	-521,8567	522,6679	0,0023	98,70	2,42	4,1620	0,1128	92,94	3,3	1,0810	0,1433	0,0205	99,62	2,0		
30	0,3	AB208	-596,0116	596,6867	0,0019	96,39	2,60	3,9216	0,1105	88,75	3,44	1,0203	0,1650	0,0070	98,62	1,93	
		AB209	-686,0430	687,4958	0,0018	95,85	2,88	4,8401	0,1035	88,25	3,75	1,0556	0,2076	0,0060	98,84	2,07	
		AB59	-491,4076	491,7483	0,0029	97,22	1,65	4,7518	0,1108	92,51	2,09	0,8943	0,1953	0,0223	98,52	1,37	
		AB57	-430,8979	432,0808	0,0027	96,66	1,78	4,6391	0,1019	91,98	2,22	0,9363	0,1951	0,0083	98,62	1,41	
		AB111	-435,1868	435,4405	0,0032	98,46	2,17	4,1905	0,1206	93,36	3,04	1,0941	0,1237	0,0345	98,56	2,01	
	0,9	AB64	-486,2358	486,4258	0,0029	98,22	2,40	4,2143	0,1204	92,63	3,34	1,0743	0,1331	0,0326	98,46	2,16	
		AB60	-539,2877	541,5232	0,0029	97,84	1,36	6,7573	0,0991	93,96	1,70	1,0082	0,2623	0,03	99,17	1,14	
		AB175	-749,7869	750,6828	0,0026	98,12	2,14	6,3703	0,1161	92,73	2,95	1,1616	0,2210	0,0461	98,14	2,02	
		AB210	-538,0917	540,4060	0,0031	96,43	2,05	7,2679	0,0975	92,62	2,78	1,1543	0,2241	0,0391	98,21	1,81	
		AB95	-569,4606	571,7570	0,0031	97,96	1,95	7,5315	0,0980	95,88	2,64	1,1264	0,2421	0,0408	97,99	1,71	

■ höchstes Bestimmtheitsmaß bzw. geringste Abweichung der Steigung S_{app.} von S_{orig.}

Tabelle E 2: Approximation vom 100. bis zum 100.000 LW – DSEV (AB 0/11 S) – 30 °C

T [°C]	f [Hz]	σ _{ax} [MPa]	Probe- körper	Gleichung 4-18				Gleichung 4-17				Gleichung 4-19					
				ε ₀	a	k	R ²	S _{app} /S _{orig.}	a	k	R ²	S _{app} /S _{orig.}	A1	A2	A3	R ²	S _{app} /S _{orig.}
30	10	0,3	AB23	-184,16	181,43	0,0058	99,69	1,56	1,5302	0,163	96,74	2,24	0,9103	0,0813	0,0252	99,78	1,43
			AB10	-216,18	214,23	0,0045	99,33	1,75	1,7707	0,1477	95,90	2,42	0,8947	0,1160	0,0075	99,76	1,45
			AB115	-211,99	210,95	0,0041	99,05	1,53	2,0429	0,1318	95,70	2,04	0,9192	0,1378	-0,0072	99,79	1,19
		AB177	-118,8	115,98	0,0099	99,77	1,55	1,7675	0,1623	97,50	2,2	0,9484	0,0713	0,0368	99,76	1,51	
		AB7	-396,19	394,08	0,0036	98,83	1,93	3,133	0,136	95,11	2,59	0,7822	0,2207	0,0122	99,67	1,5	
		AB81	-448,72	446,03	0,0035	98,61	2,1	3,2319	0,1397	94,51	2,84	0,6919	0,2522	0,0138	99,61	1,6	
	0,9	AB88	-359,15	358,55	0,0049	97,84	1,84	5,2224	0,1181	93,97	2,36	0,5492	0,4320	0,0059	99,68	1,28	
		AB34	-278,41	276,24	0,006	98,67	1,7	3,826	0,1339	94,92	2,26	0,6994	0,2804	0,0185	99,66	1,3	
		AB68	-496,06	493,66	0,0035	98,71	1,75	3,9179	0,1341	94,90	2,35	0,6794	0,2909	0,0197	99,68	1,35	
		AB56	-254,8317	253,7401	0,0037	97,75	2,11	2,3505	0,1274	94,00	2,71	0,5177	0,2739	-0,0476	99,80	1,43	
30	5	0,3	AB9	-290,0803	289,2639	0,0026	97,82	2,16	1,8866	0,1260	94,11	2,78	0,6411	0,2367	-0,0609	99,75	1,48
			AB107	-321,4330	330,6077	0,0041	97,56	1,89	11,9197	0,0656	95,67	2,18	0,6995	0,8490	-0,03	99,81	1,22
			AB176	-254,8151	252,8497	0,0050	99,33	1,74	2,6495	0,1392	96,16	2,37	0,7670	0,1548	0,0169	99,79	1,44
		AB55	-239,8950	241,7741	0,0038	99,23	1,55	4,5868	0,0892	98,49	1,91	-0,0061	0,5599	-0,1043	99,63	0,93	
		AB46	-258,7056	262,3544	0,0042	98,95	1,74	6,5883	0,0801	98,24	2,09	-1,2665	1,0508	-0,1511	98,90	0,94	
		AB156	-430,4456	429,7705	0,0034	97,95	1,88	4,2282	0,1190	94,03	2,43	0,4420	0,3431	-0,0067	99,72	1,31	
	0,9	AB171	-439,9891	436,7527	0,0037	98,72	2,19	2,9482	0,1461	94,48	2,99	0,5047	0,2354	0,0161	99,63	1,69	
		AB173	-539,9617	538,3253	0,0031	97,73	2,16	4,3206	0,1259	93,35	2,83	0,2401	0,3910	-0,0002	99,68	1,48	
		AB54	-192,7428	195,2551	0,0068	99,50	1,44	6,4325	0,0921	98,87	1,78	0,2985	0,4482	-0,01	99,97	1,0	
		AB207	-405,1630	403,7359	0,0047	98,13	2,06	5,1657	0,1238	94,20	2,69	0,2148	0,4220	0,0161	99,68	1,5	
3,33	0,3	AB45	-176,1650	180,4245	0,0071	99,52	1,33	7,6770	0,0821	99,01	1,61	0,1886	0,5601	-0,02	99,98	0,88	
		AB44	-390,2246	390,7550	0,0021	98,80	2,48	3,1717	0,0999	97,75	3,12	0,3255	0,3497	-0,0770	99,77	1,59	
		AB53	-285,1905	286,6518	0,0022	98,61	2,13	3,2920	0,0858	97,73	2,59	0,1349	0,5112	-0,1650	99,77	1,23	
		AB6	-234,3268	233,9825	0,0042	98,27	1,94	2,8873	0,1183	94,64	2,5	0,6192	0,2335	-0,0262	99,82	1,36	
		AB172	-218,4116	220,0993	0,0050	98,64	2,28	4,8297	0,0984	96,07	2,84	0,7634	0,2608	-0,0073	99,80	1,68	
		AB208	-228,1893	230,2214	0,0043	95,90	2,32	4,7616	0,0918	92,20	2,8	0,0948	0,5577	-0,1002	99,83	1,32	
	0,6	AB209	-229,5342	232,7355	0,0045	96,08	2,51	5,8873	0,0845	92,80	3,00	0,1057	0,6000	-0,0858	99,82	1,46	
		AB59	-268,4520	270,9775	0,0044	99,17	1,57	6,0045	0,0888	98,41	1,93	0,0012	0,4927	-0,0359	99,91	1,02	
		AB57	-290,1839	293,3495	0,0033	99,19	1,68	5,8158	0,0806	98,51	2,03	0,1185	0,5029	-0,0649	99,94	1,06	
		AB111	-225,4067	226,0380	0,0059	97,44	2,15	4,7599	0,1084	93,76	2,7	0,2733	0,3971	-0,0211	99,71	1,42	
0,9	AB64	-252,1998	252,9204	0,0052	97,08	2,34	4,8415	0,1071	93,23	2,93	0,1568	0,4429	-0,0305	99,74	1,49		
	AB60	-134,3304	139,1068	0,0094	99,69	1,29	8,1551	0,0813	99,27	1,56	0,2899	0,4904	-0,0036	99,99	0,92		
	AB175	-619,9890	621,4641	0,0030	96,92	2,08	7,2591	0,1035	93,07	2,60	-0,4061	0,6678	-0,0025	99,57	1,35		
	AB210	-538,0917	540,4060	0,0031	96,43	1,95	7,2679	0,0975	92,62	2,40	-0,4669	0,7191	-0,0233	99,70	1,19		
			AB95	-569,4606	571,7570	0,0031	96,09	1,83	7,5315	0,0980	92,13	2,25	-0,7412	0,8044	-0,0249	99,71	1,1

■ höchstes Bestimmtheitsmaß bzw. geringste Abweichung der Steigung $S_{\text{app.}}$ von $S_{\text{orig.}}$

Tabelle E 3: Approximation vom 1. bis zum 100.000 LW – DSEV (AB 0/11 S) – 40 °C

T [°C]	f [Hz]	σ _{ax} [MPa]	Probe- körper	Gleichung 4-18					Gleichung 4-17					Gleichung 4-19				
				ε ₀	a	k	R ²	S _{app./Sortg.}	a	k	R ²	S _{app./Sortg.}	A1	A2	A3	R ²	S _{app./Sortg.}	
40	10	0,3	AB134	-683,9538	684,1758	0,0020	96,58	2,64	4,2332	0,1169	89,29	3,57	1,2281	0,1661	0,0230	97,76	2,14	
			ABIV	-526,4264	526,9995	0,0021	96,98	2,74	3,7396	0,1129	90,21	3,69	1,2184	0,1384	0,0147	98,19	2,2	
			AB144	-369,6593	369,5020	0,0026	97,55	2,69	2,7339	0,1235	91,20	3,75	1,1418	0,0948	0,0173	98,08	2,3	
			AB142	-449,5150	449,2930	0,0023	97,20	2,51	2,9554	0,1237	90,55	3,49	1,1488	0,1058	0,0191	97,80	2,14	
		0,6	ABIII	-763,1680	765,1488	0,0021	97,25	1,82	6,3528	0,1049	90,81	2,41	1,4619	0,2487	0,0298	98,71	1,47	
			AB141	-815,1306	814,3699	0,0022	97,28	1,94	4,7479	0,1263	90,06	2,71	1,2341	0,1938	0,0402	97,76	1,71	
			AB153	-770,3573	771,5380	0,0021	96,77	2,28	5,7539	0,1101	89,88	3,05	1,3768	0,2279	0,0307	98,06	1,86	
	5	0,3	AB145	-763,6290	763,4418	0,0020	96,73	2,32	4,5259	0,1208	89,22	3,18	1,2282	0,1849	0,0302	97,76	1,93	
			AB143	-862,1732	862,4138	0,0022	97,53	1,86	5,9285	0,1182	90,55	2,54	1,3567	0,2497	0,0420	98,37	1,61	
			AB146	-914,9508	916,9258	0,0021	97,59	1,63	7,1772	0,1072	91,24	2,17	1,5414	0,2958	0,0399	98,73	1,37	
			AB147	-955,2608	958,2851	0,0022	97,47	1,64	8,5502	0,1029	91,28	2,16	1,7264	0,3731	0,0443	98,70	1,40	
		0,6	ABV	-720,0743	721,4574	0,0020	96,46	2,47	5,4450	0,1069	89,28	3,25	1,1768	0,2178	0,0210	98,40	1,91	
			AB127	-473,6431	473,8566	0,0020	96,37	2,62	3,0023	0,1158	88,99	3,54	1,0642	0,1201	0,0063	97,84	2,05	
			AB128	-535,9413	535,7184	0,0020	96,42	2,44	3,1229	0,1218	88,73	3,34	1,0405	0,1270	0,0135	97,68	1,95	
40	5	0,3	ABI	-1185,343	1188,4165	0,0018	95,59	1,90	8,9018	0,1009	88,04	2,45	1,3615	0,4269	0,0383	98,36	1,49	
			AB129	-555,0533	555,4069	0,0020	97,36	1,53	3,6458	0,1153	90,27	2,08	1,0834	0,1446	0,0128	98,85	1,20	
			AB148	-854,0650	854,6640	0,0022	97,93	1,77	6,0038	0,1164	91,54	2,42	1,1939	0,2320	0,0411	98,55	1,56	
			AB133	-1322,157	1324,4762	0,0019	96,83	1,62	9,3144	0,1073	89,64	2,14	1,3784	0,4592	0,0509	98,42	1,42	
		0,9	ABII	-924,8492	925,8294	0,0020	97,92	1,43	6,3676	0,1134	91,32	1,93	1,2040	0,2594	0,0389	99,02	1,21	
			AB149	-982,9319	986,8229	0,0020	97,38	1,42	8,8482	0,0974	91,31	1,84	1,4717	0,3782	0,0366	99,28	1,15	
			AB126	-734,6583	737,3319	0,0017	94,81	2,65	5,9465	0,0942	87,46	3,36	1,1381	0,2515	0,0037	98,51	1,84	
	3,33	0,3	AB131	-678,3600	678,9760	0,0018	95,33	2,83	4,2323	0,1108	87,14	3,73	1,0027	0,1842	0,0092	97,90	2,08	
			AB150	-660,6380	662,4509	0,0020	95,90	2,45	5,3510	0,1019	88,70	3,18	1,1010	0,2135	0,0125	98,36	1,81	
			AB135	-1092,592	1094,7901	0,0018	95,63	1,91	7,7908	0,1042	87,89	2,49	1,1021	0,3557	0,0341	98,29	1,49	
			AB140	-770,3824	770,4924	0,0022	98,12	1,43	5,1134	0,1196	91,39	1,96	1,0211	0,2001	0,0343	99,06	1,21	
		0,6	AB174	-994,5887	996,4892	0,0021	97,36	1,90	7,5348	0,1082	90,84	2,54	1,1643	0,3064	0,0418	98,38	1,63	
			AB132	-1131,997	1137,0695	0,0022	98,11	1,17	11,1135	0,0975	92,70	1,53	1,4643	0,5249	0,0501	99,55	1,04	
			AB130	-435,2176	438,3788	0,0042	98,97	1,14	8,3267	0,0968	96,72	1,55	1,0940	0,2889	0,0436	99,31	0,99	
			AB159	-372,3318	380,5123	0,0052	99,05	1,12	12,7385	0,0793	97,40	1,45	1,4937	0,4982	0,0448	99,57	0,96	

■ höchstes Bestimmtheitsmaß bzw. geringste Abweichung der Steigung S_{app.} von S_{orig.}

Tabelle E 4: Approximation vom 100. bis zum 100.000 LW – DSEV (AB 0/11 S) – 40 °C

T [°C]	f [Hz]	σ _{ax} [MPa]	Probe- körper	Gleichung 4-18					Gleichung 4-17					Gleichung 4-19				
				ε ₀	a	k	R ²	S _{app} /S _{orig.}	a	k	R ²	S _{app} /S _{orig.}	A1	A2	A3	R ²	S _{app} /S _{orig.}	
40	10	0,3	AB134	-461,4512	462,7450	0,0027	94,99	2,44	5,0612	0,0997	90,50	2,99	0,3023	0,6283	-0,0860	99,69	1,34	
			ABIV	-356,7018	358,0870	0,0029	95,48	2,55	4,4079	0,0971	91,30	3,12	0,5488	0,5113	-0,0939	99,68	1,44	
			AB144	-220,5381	220,7959	0,0041	96,06	2,60	3,1882	0,1088	91,59	3,25	0,6483	0,3820	-0,0837	99,64	1,53	
		AB142	-251,3144	251,5895	0,0039	95,49	2,42	3,4642	0,1084	90,80	3,02	0,5458	0,4410	-0,0899	99,58	1,38		
		ABIII	-348,3904	351,9718	0,0041	96,65	1,66	7,4882	0,0890	93,36	2,01	0,5254	0,6732	-0,0369	99,89	1,01		
		AB141	-374,7876	375,2401	0,0044	96,00	1,84	5,6871	0,1089	91,51	2,29	0,1667	0,6423	-0,0348	99,80	1,08		
	5	0,6	AB153	-542,9173	545,5124	0,0027	95,52	2,09	6,8280	0,0935	91,53	2,55	0,2274	0,7476	-0,0565	99,77	1,19	
			AB145	-565,3739	566,4162	0,0025	95,37	2,15	5,4537	0,1028	90,86	2,66	0,2100	0,6560	-0,0645	99,77	1,20	
			AB143	-378,5271	380,4910	0,0046	96,93	1,72	7,1091	0,1007	93,28	2,12	0,3084	0,6817	-0,0161	99,93	1,07	
		AB146	-516,8765	520,6313	0,0033	97,26	1,49	8,4739	0,0912	94,12	1,81	0,4696	0,7414	-0,0131	99,95	0,94		
		AB147	-530,0127	535,0850	0,0035	97,18	1,49	10,0404	0,0873	94,17	1,80	0,3423	0,9232	-0,0060	99,93	0,95		
		ABV	-249,5287	252,6252	0,0050	95,71	2,22	6,5371	0,0892	92,11	2,66	-0,0484	0,7122	-0,0719	99,86	1,25		
3,33	0,3	AB127	-307,2893	308,2844	0,0028	94,65	2,42	3,5936	0,0985	90,11	2,95	0,1566	0,5850	-0,1541	99,68	1,29		
		AB128	-363,5217	364,1663	0,0027	94,82	2,26	3,7740	0,1035	90,08	2,79	0,0367	0,5953	-0,1303	99,74	1,21		
		ABI	-526,7439	533,0622	0,0034	96,46	1,63	10,8661	0,0815	93,42	1,94	-0,6534	1,1289	-0,0224	99,94	0,97		
	AB129	-302,1362	303,5968	0,0033	97,08	1,40	4,3930	0,0973	93,60	1,72	0,4802	0,4244	-0,0663	99,96	0,85			
	AB148	-499,5798	501,5371	0,0035	97,27	1,65	7,0876	0,1004	93,73	2,05	-0,0169	0,6403	-0,0114	99,92	1,06			
	AB133	-589,1492	594,7231	0,0036	97,67	1,42	11,3096	0,0885	94,85	1,73	-0,5331	1,0699	0,0116	99,98	0,95			
0,9	0,6	ABII	-443,0071	445,8235	0,0038	98,07	1,3	7,6079	0,0962	95,17	1,61	0,2988	0,5732	-0,0003	99,98	0,89		
		AB149	-282,2436	288,5990	0,0058	98,07	1,27	10,4215	0,0815	95,79	1,52	0,3902	0,7557	0,0011	99,98	0,87		
		AB126	-226,9080	231,5929	0,0045	94,72	2,27	7,1851	0,0758	91,48	2,65	-0,5107	0,9304	-0,1358	99,85	1,2		
	AB131	-365,2510	367,4501	0,0029	94,39	2,48	5,2101	0,0907	90,21	2,99	-0,5464	0,8176	-0,1480	99,80	1,29			
	AB150	-365,2864	368,6826	0,0031	95,04	2,17	6,4107	0,0843	91,38	2,58	-0,4084	0,8006	-0,1090	99,78	1,18			
	AB135	-218,5095	223,9508	0,0073	96,21	1,66	9,5693	0,0843	93,15	1,97	-0,8900	1,0007	-0,0326	99,96	0,97			
0,9	0,6	AB140	-261,1644	262,9116	0,0057	98,23	1,32	6,1481	0,1019	95,29	1,64	0,2804	0,4442	-0,0044	99,99	0,9		
		AB174	-607,5867	611,3110	0,0030	96,70	1,74	8,9034	0,0921	93,26	2,12	-0,7934	0,8920	-0,0149	99,90	1,07		
		AB132	-301,5836	309,5545	0,0068	99,23	1,06	12,9575	0,0826	97,67	1,28	0,4945	0,8060	0,0353	99,97	0,86		
	AB130	-435,2176	438,3788	0,0042	98,97	1,04	8,3267	0,0968	96,72	1,29	0,3978	0,5018	0,0221	99,97	0,79			
	AB159	-372,3318	380,5123	0,0052	99,05	1,01	12,7385	0,0793	97,40	1,21	0,5244	0,7870	0,0274	99,96	0,79			

■ höchstes Bestimmtheitsmaß bzw. geringste Abweichung der Steigung S_{app.} von S_{orig.}

Tabelle E 5: Approximation vom 1. bis zum 100.000 LW – DSEV (AB 0/11 S) – 50 °C

T [°C]	f [Hz]	σ _{ax} [MPa]	Probe- körper	Gleichung 4-18					Gleichung 4-17					Gleichung 4-19				
				ε ₀	a	k	R ²	S _{app} /S _{orig.}	a	k	R ²	S _{app} /S _{orig.}	A1	A2	A3	R ²	S _{app} /S _{orig.}	
50	10	0,3	AB79	-490,2777	490,8202	0,0025	98,46	1,39	4,0052	0,1155	92,46	1,90	1,2450	0,1421	0,0223	99,32	1,15	
			AB112	-504,1981	505,7498	0,0020	97,21	1,72	4,2525	0,1017	90,74	2,25	1,2823	0,1639	0,0032	99,35	1,27	
			AB115	-84,6918	84,0253	0,0096	99,13	1,51	2,0429	0,1318	95,06	2,04	1,1022	0,0370	0,0331	99,06	1,54	
		0,6	AB104	-643,2517	644,2913	0,0028	99,16	0,93	5,9702	0,1157	94,24	1,28	1,4297	0,2230	0,0428	99,81	0,84	
			AB87	-858,6443	863,6423	0,0023	98,01	1,12	9,7502	0,0938	92,81	1,46	1,9530	0,4268	0,0395	99,82	0,92	
			AB206	-882,239	884,966	0,0017	98,37	1,17	6,6169	0,1003	93,09	1,55	1,5295	0,2478	0,0270	99,79	0,941	
	5	0,3	AB84	-881,5332	885,9406	0,0021	97,81	1,27	9,0090	0,0949	92,31	1,65	1,8276	0,3863	0,0356	99,76	1,02	
			AB67	-1045,910	1052,6728	0,0025	98,53	0,93	12,9994	0,0944	93,98	1,22	2,5947	0,7080	0,0596	99,82	0,88	
			AB92	-671,6946	675,1176	0,0035	99,53	0,87	9,2850	0,1069	95,87	1,19	1,9424	0,3771	0,0593	99,94	0,88	
		0,6	AB122	-802,1055	805,4670	0,0030	99,41	0,9	9,3474	0,1065	95,34	1,24	1,9263	0,3945	0,0582	99,90	0,9	
			AB94	-924,4870	926,3970	0,0019	97,27	1,29	6,5894	0,1058	90,52	1,70	1,2341	0,2777	0,0287	99,34	1,01	
			AB123	-514,7496	515,3019	0,0020	97,17	1,57	3,5273	0,1122	89,96	2,10	1,0841	0,1459	0,0058	99,07	1,18	
50	5	0,3	AB124	-757,0673	758,4150	0,0020	97,11	1,42	5,6085	0,1074	90,38	1,87	1,1117	0,2551	0,0178	99,51	1,05	
			AB119	-393,5839	394,8646	0,0043	95,58	0,97	5,7480	0,1161	92,50	1,36	1,3707	0,1406	0,0505	95,30	1,02	
			AB93	-715,4688	716,3335	0,0026	99,22	1,01	5,9750	0,1167	94,07	1,41	1,2275	0,2197	0,0425	99,82	0,92	
		0,6	AB43	-871,6455	873,9298	0,0022	97,87	1,24	7,3465	0,1057	91,71	1,65	1,2981	0,3099	0,0360	99,62	1,01	
			AB114	-758,7786	763,0746	0,0032	99,40	0,78	10,2243	0,1032	95,67	1,06	1,7203	0,4249	0,0573	99,95	0,79	
			AB120	-395,9786	395,8630	0,0064	99,78	0,72	7,0460	0,1289	96,58	1,04	1,3290	0,2646	0,0659	99,89	0,83	
	3,33	0,9	AB117	-658,0602	658,7533	0,0037	99,63	0,84	7,3494	0,1215	95,62	1,19	1,3363	0,2850	0,0596	99,87	0,88	
			AB97	-625,8856	626,5801	0,0019	97,53	1,25	4,0997	0,1120	90,56	1,68	1,0346	0,1640	0,0128	99,29	0,96	
			AB24	-690,4701	692,1786	0,0019	96,69	1,76	5,3343	0,1034	89,63	2,31	1,0803	0,2225	0,0121	99,34	1,29	
		0,3	AB98	-240,5089	239,7363	0,0051	99,81	0,9	2,9515	0,1367	95,66	1,33	1,0301	0,0808	0,0369	99,84	0,89	
			AB70	-658,3116	659,3320	0,0030	99,46	0,88	6,3847	0,1171	94,94	1,23	1,1610	0,2252	0,0468	99,89	0,84	
			AB22	-759,4926	761,0682	0,0024	98,50	1,05	6,4501	0,1103	92,73	1,42	1,1278	0,2507	0,0358	99,73	0,88	
3,33	0,6	AB83	-708,5783	710,6279	0,0027	98,91	0,94	7,1903	0,1094	93,90	1,28	1,1962	0,2740	0,0422	99,86	0,83		
		AB72	-473,9567	474,6946	0,0063	99,69	0,72	8,9577	0,1247	96,63	1,03	1,2999	0,3888	0,0702	99,88	0,89		
50	0,9	0,9	AB69	-89,7584	92,5946	0,0224	99,70	0,73	7,8537	0,1187	98,07	0,98	1,4769	0,2241	0,0645	99,92	0,84	
			AB86	-17,1584	22,2087	0,0683	99,92	0,72	8,1285	0,1187	99,73	1,03	1,4122	0,2233	0,0685	99,92	0,86	

■ höchstes Bestimmtheitsmaß bzw. geringste Abweichung der Steigung S_{appr.} von S_{orig.}

Tabelle E 6: Approximation vom 100. bis zum 100.000 LW – DSEV (AB 0/11 S) – 50 °C

T [°C]	f [Hz]	σ _{ax} [MPa]	Probe- körper	Gleichung 4-18					Gleichung 4-17					Gleichung 4-19				
				ε ₀	a	k	R ²	S _{app} /S _{orig.}	a	k	R ²	S _{app} /S _{orig.}	A1	A2	A3	R ²	S _{app} /S _{orig.}	
50	10	0,3	AB79	-489,8457	491,2513	0,0023	98,41	1,29	4,7197	0,0997	95,51	1,61	0,9188	0,3127	-0,0219	99,99	0,89	
			AB112	-211,1533	213,9270	0,0042	97,61	1,54	5,0541	0,0849	94,92	1,85	0,9553	0,3685	-0,0579	99,99	0,97	
			AB115	-192,8414	191,8160	0,0045	99,05	1,53	2,0429	0,1318	95,70	2,04	0,9192	0,1378	-0,0072	99,79	1,19	
		0,6	AB104	-307,6938	310,1501	0,0053	99,87	1,18	6,9716	0,1007	98,89	1,30	1,4971	0,2054	0,0445	99,92	1,18	
			AB87	-437,4160	444,6368	0,0040	99,39	1,01	11,3005	0,0794	97,97	1,21	1,6776	0,5489	0,0286	99,96	0,83	
			AB206	-881,497	885,707	0,0016	99,29	1,06	7,7204	0,0853	97,56	1,30	1,3512	0,3367	0,0123	99,96	0,84	
	5	0,3	AB84	-257,2263	264,0023	0,0062	99,22	1,14	10,5225	0,0798	97,69	1,36	1,5413	0,5186	0,0219	99,98	0,9	
			AB67	-290,4969	300,1411	0,0077	99,77	0,86	14,8879	0,0811	98,87	1,03	2,2964	0,8322	0,0543	99,96	0,81	
			AB92	-105,5307	111,2261	0,0178	99,92	0,86	10,4902	0,0950	99,34	1,04	1,9976	0,3664	0,0597	99,96	0,88	
		0,6	AB122	-202,9468	208,2608	0,0101	99,87	0,87	10,6423	0,0940	99,04	1,08	1,8549	0,4282	0,0557	99,95	0,86	
			AB94	-409,8733	413,9382	0,0036	98,44	1,14	7,9310	0,0878	96,10	1,39	0,6713	0,4944	-0,0021	99,94	0,8	
			AB123	-265,9602	267,6564	0,0034	97,26	1,40	4,2635	0,0939	94,00	1,72	0,6041	0,3846	-0,0678	99,95	0,87	
3,33	0,3	AB124	-351,5352	354,6849	0,0037	98,00	1,26	6,6975	0,0903	95,27	1,54	0,5733	0,4687	-0,0202	99,99	0,84		
		AB119	-393,3407	395,1079	0,0042	99,73	0,94	6,5333	0,1038	98,12	1,20	1,0533	0,2553	0,0341	99,97	0,83		
		AB93	-204,3324	206,7456	0,0079	99,75	0,96	6,9765	0,1017	98,34	1,21	1,1271	0,2581	0,0372	99,97	0,86		
	0,6	AB43	-330,9600	335,5114	0,0049	99,31	1,11	8,7506	0,0887	97,58	1,36	1,0190	0,4175	0,0233	99,98	0,89		
		AB114	16,7016	0,8355	0,2614	95,35	1,33	11,5347	0,0915	99,33	0,93	1,7713	0,4169	0,0575	99,96	0,79		
		AB120	-34,7384	38,3123	0,0460	99,91	0,78	7,9832	0,1169	99,51	0,93	1,4058	0,2498	0,0665	99,96	0,84		
50	0,9	AB117	-400,0021	401,8875	0,0056	99,91	0,81	8,4293	0,1082	99,29	1,04	1,3865	0,2779	0,0597	99,96	0,88		
		AB97	-284,9067	286,9228	0,0037	97,99	1,12	4,9416	0,0939	95,09	1,38	0,5553	0,3601	-0,0369	99,98	0,74		
		AB24	-225,3666	228,9434	0,0050	97,83	1,55	6,4482	0,0850	95,27	1,86	0,5070	0,4497	-0,0345	99,98	1,01		
	0,3	AB98	-210,8214	210,3845	0,0057	99,92	0,88	3,4148	0,1227	98,68	1,17	1,0241	0,0855	0,0354	99,94	0,87		
		AB70	-219,2649	221,7057	0,0080	99,93	0,84	7,3711	0,1032	99,00	1,07	1,2025	0,2183	0,0472	99,97	0,84		
		AB22	-224,4658	227,9680	0,0069	99,54	0,96	7,6267	0,0940	97,97	1,19	0,9670	0,3086	0,0280	99,96	0,81		
50	0,6	AB83	-179,4458	183,4554	0,0092	99,88	0,88	8,3712	0,0947	98,90	1,09	1,2692	0,2600	0,0431	99,97	0,84		
		AB72	-226,6497	228,7238	0,0122	99,75	0,71	10,1045	0,1130	99,64	0,92	1,3524	0,3840	0,0702	99,96	0,89		
	0,9	AB69	-177,8905	180,2069	0,0124	99,55	0,7	8,5524	0,1104	99,87	0,9	1,7259	0,1667	0,0678	99,97	0,91		
		AB86	-17,1584	22,2087	0,0683	99,92	0,83	8,1285	0,1187	99,73	0,93	1,4122	0,2233	0,0685	99,97	0,90		

■ höchstes Bestimmtheitsmaß bzw. geringste Abweichung der Steigung S_{appr.} von S_{orig.}

Tabelle: E 7 Approximation vom 100. bis zum 100.000 LW – DSEV (SMA 0/11 S, SMA I)
– 50, 40, 30 °C

Temperatur T [°C]	Frequenz f [Hz]	Spannung σ_{ax} [MPa]	Probe- körper	A1	A2	A3	R ²
50	10	0,3	S49	0,8819	0,2461	-0,0768	99,94
			S50	0,9024	0,2498	-0,0576	99,98
			S206n	0,7303	0,5015	-0,0966	99,93
			S51	0,9443	0,2050	-0,0312	99,96
		0,6	I5	0,9126	0,3858	-0,0279	99,97
			S20	1,0731	0,2788	-0,0309	99,95
			S217	0,9926	0,5509	-0,0311	99,96
			S175	0,9849	0,2969	-0,0102	99,96
		0,9	S52	1,1646	0,2791	0,0117	99,88
			S53	0,9931	0,4480	0,0171	99,91
			S54	1,1208	0,3011	0,0326	99,97
			S214	1,2883	0,5320	-0,0097	99,96
40	5	0,3	S66	1,1706	0,2992	0,0162	99,90
			S55	0,4256	0,4776	-0,1021	99,94
			S56	0,7984	0,2608	-0,0543	99,96
			S57	0,6110	0,4244	-0,0905	99,95
		0,6	S211	0,6683	0,5168	-0,1195	99,98
			S206	0,3454	0,6093	-0,1406	99,94
			S58	0,6973	0,5082	-0,0533	99,85
			S59	0,6555	0,4501	0,0156	99,94
		0,9	S207n	0,9520	0,4933	-0,0332	99,96
			S215	1,6483	0,5995	0,0201	99,83
			S60	1,0823	0,2691	0,0083	99,83
			S37	1,0196	0,3721	0,0137	99,81
30	3,33	0,3	S38	1,2580	0,1953	0,0370	99,91
			S39	1,1501	0,2590	0,0227	99,93
			S216	1,1830	0,2401	0,0163	99,94
			S207	1,4770	0,1830	0,0251	99,75
		0,6	S62	0,7077	0,4037	-0,0042	99,89
			S71	0,9602	0,1940	0,0214	99,91
			S61	0,7450	0,2511	-0,0413	99,96
			S63	1,0061	0,2422	-0,0029	99,28
		0,9	S72	1,0020	0,2291	-0,0011	99,85
			S83	0,8224	0,3304	-0,0152	99,87
			S73	1,4498	0,1702	0,0396	28,31
			S84	1,0709	0,2312	0,0298	99,95
20	10	0,3	S210	1,3191	0,3071	0,0337	99,90
			S64	0,8209	0,1906	-0,0205	99,68
			S65	0,8513	0,2329	-0,0475	99,75
			S212a	0,7629	0,4192	-0,0608	99,77
		0,6	S76	0,8804	0,2524	-0,0171	99,95
			S75	0,4808	0,5961	-0,1045	99,79
		0,9	S74	0,9608	0,4985	0,0039	99,94
			S85	1,1910	0,2765	0,0094	99,92
	5	0,3	S91	0,6813	0,2715	-0,0606	99,88
			S218	0,6611	0,3524	-0,0445	99,91
			S203	0,5176	0,4924	-0,1304	99,93
			S89	0,3609	0,5204	-0,0312	99,99
		0,6	S88	0,7472	0,3092	-0,0272	99,99
			S87	1,0206	0,2481	0,0154	99,87
		0,9	S86	0,9560	0,3042	-0,0042	99,98
	3,33	0,3	S201	0,4280	0,3756	-0,0658	99,94
			S202	0,5764	0,4285	-0,0656	99,96
			S205	0,2851	0,5876	-0,1282	99,96
			S213	0,4254	0,4638	-0,1064	99,86
		0,6	S208	0,5263	0,4610	-0,0659	99,98
			S209	-0,0555	0,6694	-0,0457	99,97
		0,9	S90	1,0688	0,2358	0,0412	99,88
			S215	0,6158	0,4569	-0,0020	99,97

Tabelle E7 (fortgesetzt)

Temperatur T [°C]	Frequenz f [Hz]	Spannung σ_{ax} [MPa]	Probe- körper	A1	A2	A3	R ²
30	10	0,3	S92	0,9209	0,1411	-0,0050	99,91
			S93	0,9416	0,0709	0,0110	99,89
			S173	1,4044	0,1167	0,0124	99,95
			S174	1,0085	0,0622	0,0210	99,88
		0,6	S96	0,9213	0,2478	0,0156	99,76
			S97	0,8592	0,1786	0,0257	99,80
			S171	0,9261	0,1278	0,0195	99,78
		0,9	S94	0,8994	0,2037	0,0180	99,90
			S95	0,9002	0,2382	0,0166	99,94
			S172	0,9449	0,1894	0,0243	99,88
	5	0,3	S98	0,8822	0,1476	-0,0082	99,94
			S99	0,7932	0,1789	-0,0363	99,86
			S170	1,7952	0,2391	0,0219	99,98
			S167	0,9447	0,1463	-0,0069	99,89
		0,6	S140	0,6304	0,3452	-0,0223	99,92
			S142	0,6440	0,2171	0,0122	99,90
			S151	0,8332	0,1250	0,0314	99,84
			S204	0,5420	0,2897	0,0306	99,80
		0,9	S144	0,9011	0,2395	0,0226	99,96
			S145	0,8970	0,2049	0,0203	99,97
			S169	0,6852	0,2011	0,0271	99,80
	3,33	0,3	S135	0,6821	0,2001	-0,0307	99,74
			S146	0,7351	0,2041	-0,0203	99,91
			S168	0,7739	0,1250	0,0091	99,80
			S211	0,0962	0,6682	-0,0460	99,93
		0,6	S212	1,3628	0,2104	0,0137	99,99
			S136	0,4345	0,3976	-0,0418	99,94
			S137	0,6336	0,2600	-0,0223	99,94
			S147	0,5183	0,3098	-0,0096	99,92
			S208n	0,7190	0,5043	0,0066	99,88
		0,9	S210	0,9864	0,2569	0,0021	99,94
			S106	0,8044	0,1611	0,0124	99,98
			S134	0,4144	0,3479	-0,0072	99,94
			S213	0,5005	0,3992	-0,0243	99,88
		0,9	S214	0,2194	0,4252	0,0023	99,84
			S209	0,5682	0,3796	0,0105	99,89
			S161	0,4994	0,2582	-0,0061	99,83

Tabelle E 8 Approximation vom 100. bis zum 100.000 LW – DSEV (SMA 0/11 S, SMA II)
– 50, 30 °C

Temperatur T [°C]	Frequenz f [Hz]	Spannung σ_{ax} [MPa]	Probe- körper	A1	A2	A3	R ²
50	10	0,3	M34	0,6485	0,4149	-0,0232	99,86
			M23	0,8434	0,2382	-0,0034	99,81
			M32	0,8891	0,2925	-0,0064	99,98
		0,6	M42	0,7769	0,3827	0,0076	99,97
			M43	0,9480	0,2623	0,0209	99,98
			M44	0,7814	0,3760	0,0099	99,98
			M45	0,9497	0,2808	0,0217	99,99
		0,9	M16	0,6494	0,4355	0,0102	99,91
			M31	0,7229	0,6286	0,0091	99,98
			M11	0,9075	0,3476	0,0511	99,99
			M12	0,7139	0,4879	0,0288	99,98
		0,9	M30	0,9492	0,5202	0,0405	99,97
			M33	1,2259	0,3474	0,0363	99,97
30	10	0,3	M21	1,1734	0,0411	0,0294	99,98
			M37	1,5027	0,0659	0,0379	99,99
		0,6	M35	1,1175	-0,0295	0,0642	99,90
			M36	1,2491	0,0446	0,0502	99,97
		0,9	M22	1,0570	0,0271	0,0685	99,95
			M41	1,1598	0,0876	0,0555	99,97

Tabelle E 9 Approximation vom 100. bis zum 100.000 LW – DSEV (OPA 0/8)
– 30, 40, 50 °C

Temperatur T [°C]	Frequenz f [Hz]	Spannung σ_{ax} [MPa]	Probe- körper	A1	A2	A3	R ²
30	10	0,3	OPA80	1,0158	0,4436	0,0512	99,98
			OPA93	1,0054	0,1376	0,0353	99,93
		0,6	OPA63	1,0135	0,4980	0,0550	99,98
			OPA94	1,0712	0,3570	0,0580	100,00
		0,9	OPA73	0,9372	0,5371	0,0634	99,98
			OPA104	0,9584	0,6232	0,0600	99,99
	5	0,3	OPA60	1,1007	0,2096	0,0484	99,99
			OPA99	0,8702	0,1886	0,0406	99,98
		0,6	OPA62	1,3005	0,2656	0,0540	99,99
			OPA102	0,5565	0,4822	0,0517	99,98
		0,9	OPA71	0,6006	0,5611	0,0637	99,99
			OPA101	0,5441	0,6237	0,0647	99,97
	3,33	0,3	OPA72	0,8986	0,1989	0,0542	99,98
			OPA90	1,0721	0,1842	0,0464	100,00
		0,6	OPA79	0,8318	0,2508	0,0591	99,99
			OPA89	1,0906	0,2332	0,0542	99,98
		0,9	OPA61	1,1048	0,2498	0,0714	99,93
			OPA109	0,6702	0,4081	0,0594	99,96
40	10	0,3	OPA44	1,3397	0,1443	0,0583	100,00
			OPA88	1,3453	0,1998	0,0518	99,99
		0,6	OPA47	1,5444	0,5719	0,0606	99,98
			OPA59	1,1577	0,3442	0,0535	99,98
		0,9	OPA83	1,5232	0,2897	0,0588	99,97
			OPA51	1,5177	0,5073	0,0696	99,93
	5	0,3	OPA107	1,0267	0,7412	0,0723	99,99
			OPA45	0,9932	0,2883	0,0582	100,00
		0,6	OPA86	1,3011	0,1670	0,0514	100,00
			OPA52	1,4363	0,3031	0,0631	99,99
		0,9	OPA96*	1,2907	0,1581	0,0647	99,93
			OPA53	1,1626	0,3983	0,0711	99,99
	3,33	0,3	OPA100	1,0888	0,4614	0,0683	99,96
			OPA42	1,1685	0,1419	0,0558	99,98
		0,6	OPA87	1,2679	0,1613	0,0610	99,98
			OPA48	1,0839	0,3148	0,0589	99,99
		0,9	OPA110	1,2277	0,2291	0,0678	99,90
			OPA50	0,9751	0,4260	0,0665	99,98
50	10	0,3	OPA111	1,1560	0,4921	0,0702	99,93
			OPA70	1,4326	0,2396	0,0616	99,99
		0,6	OPA91	1,2334	0,2070	0,0432	99,99
			OPA57	1,6986	0,3622	0,0655	99,98
		0,9	OPA56	1,5580	0,1920	0,0693	99,98
			OPA97	1,6772	0,1698	0,0730	99,93
	5	0,3	OPA81	1,9053	0,4044	0,0779	99,98
			OPA93*	1,9287	0,3332	0,0762	99,97
		0,6	OPA85	1,2145	0,1287	0,0603	99,99
			OPA96	1,2173	0,1189	0,0627	99,98
		0,9	OPA84	1,6472	0,2653	0,0681	99,95
			OPA191	1,5088	0,2270	0,0778	99,98
	3,33	0,3	OPA82	1,4494	0,3930	0,0765	99,99
			OPA95	1,9622	0,2763	0,0874	99,93
		0,6	OPA55	1,0736	0,1463	0,0651	99,96
			OPA92	1,0115	0,1800	0,0605	100,00
		0,9	OPA98	1,0857	0,3384	0,0785	99,99
			OPA105	0,9350	0,3621	0,0723	99,99
		0,3	OPA58	1,2567	0,3331	0,0752	99,99
			OPA194	1,2973	0,3464	0,0858	99,98

Tabelle E 10 Approximation vom 100. bis zum 100.000 LW – DSEV (ABi 0/16S)
- 50, 40, 30 °C

Temperatur T [°C]	Frequenz f [Hz]	Spannung σ_{ax} [MPa]	Probe- körper	A1	A2	A3	R ²
50	10	0,3	BM28	0,8453	0,2697	-0,0024	99,95
			BM34	0,8061	0,3397	-0,0395	99,88
			BM45	0,9390	0,3264	-0,0154	99,96
		0,6	BM26	1,0869	0,3577	0,0206	99,99
			BM41	1,2272	0,2935	0,0339	99,99
			BM98	1,0669	0,4441	0,0214	99,99
		0,9	BM25	1,4223	0,4404	0,0447	99,98
			BM50	1,6314	0,3485	0,0419	99,98
			BM102	1,1066	0,5247	0,0556	99,96
	5	0,3	BM23	0,3191	0,5394	-0,0493	99,92
			BM32	0,6902	0,3180	-0,0261	99,94
		0,6	BM31	1,2608	0,2032	0,0492	99,99
			BM47	0,9802	0,3394	0,0135	99,99
		0,9	BM33	0,6933	0,8224	0,0330	99,99
			BM42	1,3574	0,4363	0,0638	99,99
	3,33	0,3	BM40	0,9017	0,2227	0,0123	100,00
			BM46	1,0030	0,1874	0,0065	100,00
		0,6	BM39	1,0671	0,3549	0,0424	100,00
			BM43	0,3820	0,4046	0,0169	99,99
			BM118	0,9542	0,2530	0,0421	99,98
		0,9	BM48	1,3810	0,3209	0,0533	99,99
			BM49	1,4928	0,4857	0,0467	99,98
			BM65	1,3699	0,1357	0,0679	99,93
40	10	0,3	BM51	0,9563	0,2663	-0,0048	99,80
			BM82	0,8704	0,2356	-0,0023	99,85
			BM108	0,7885	0,2564	0,0093	99,80
		0,6	BM44	1,3226	0,6123	0,0096	99,95
			BM57	0,6605	0,4344	0,0073	99,86
			BM79	0,9564	0,4338	0,0102	99,95
		0,9	BM60	0,9973	0,3363	0,0433	99,97
			BM81	1,1622	0,3607	0,0301	99,99
			BM84	1,1615	0,4533	0,0432	99,99
	5	0,3	BM64	0,6785	0,2905	-0,0105	99,81
			BM71	0,7143	0,2424	-0,0048	99,87
			BM59	0,6910	0,3033	-0,0231	99,91
		0,6	BM52	0,6191	0,4018	-0,0085	99,95
			BM58	0,6151	0,3412	0,0309	99,97
			BM114	0,4611	0,6731	-0,0111	99,96
		0,9	BM67	0,5875	0,4519	0,0094	99,95
			BM76	0,8457	0,3789	0,0301	99,99
			BM115	0,4601	0,6218	0,0280	99,97
	3,33	0,3	BM88	0,7716	0,5205	0,0439	99,99
			BM77	-0,3764	1,2907	-0,0526	99,96
			BM63	0,7933	0,2338	-0,0290	99,93
		0,6	BM53	0,6469	0,3226	-0,0522	99,93
			BM78	0,7989	0,3440	0,0240	100,00
			BM75	0,4792	0,3492	0,0199	99,96
		0,9	BM54	0,7296	0,4073	0,0123	99,99
			BM69	0,1030	0,6441	0,0190	99,98
			BM83	1,1531	0,2641	0,0620	99,99
30	10	0,3	BM72	0,9468	0,2750	0,0445	99,99
			BM11	0,8694	0,1183	0,0213	99,93
			BM12	1,1016	0,0881	0,0182	99,97
		0,6	BM109	1,0439	0,0526	0,0316	99,96
			BM9	1,6066	0,1237	0,0463	99,93
			BM10	1,0920	0,1001	0,0478	99,94
		0,9	BM111	1,9835	0,3020	0,0429	99,93
			BM1	1,0604	0,0987	0,0575	99,92
			BM2	1,3325	0,0821	0,0531	99,94
			BM100	0,9717	0,1197	0,0471	99,97

Tabelle E10 (fortgesetzt)

Temperatur T [°C]	Frequenz f [Hz]	Spannung σ_{ax} [MPa]	Probe- körper	A1	A2	A3	R ²
30	5	0,3	BM15	1,3492	0,2247	0,0118	99,96
			BM17	1,3158	0,1002	0,0229	99,93
			BM110	0,9944	0,1029	0,0241	99,93
		0,6	BM14	1,2635	0,0511	0,0501	99,96
			BM19	1,0217	0,1762	0,0364	99,94
			BM103	0,7567	0,1538	0,0407	99,95
		0,9	BM13	4,5578	1,3927	0,0406	99,99
			BM27	0,8567	0,1849	0,0416	99,94
			BM107	0,7037	0,1991	0,0400	99,91
	3,33	0,3	BM20	0,7228	0,1686	0,0132	99,93
			BM24	1,4684	0,2229	0,0159	99,97
			BM97	1,6963	0,1370	0,0227	99,96
		0,6	BM18	0,7685	0,1519	0,0358	99,91
			BM22	0,5926	0,1746	0,0158	99,85
			BM87	0,9934	0,3583	0,0384	99,91
		0,9	BM16	1,1947	0,2673	0,0343	99,94
			BM21	0,6017	0,1399	0,0458	99,84
			BM86	0,6053	0,2411	0,0431	99,92

Tabelle E 11 Approximation vom 100. bis zum 100.000 LW – DSEV (ATS 0/32 CS)
- 50, 40, 30 °C

Temperatur T [°C]	Frequenz f [Hz]	Spannung σ_{ax} [MPa]	Probe- körper	A1	A2	A3	R ²
50	10	0,3	T70	0,9021	0,3878	0,0287	99,99
			T119	0,8518	0,4672	0,0213	99,99
		0,6	T75	1,1701	0,6829	0,0675	99,99
			T125	1,0351	0,6806	0,0712	99,99
		0,9	T78	0,4969	1,8371	0,0824	99,99
			T106	0,9301	1,4659	0,0971	99,98
	5	0,3	T133	0,7848	0,3391	0,0379	99,99
			T131	0,3801	0,5080	0,0219	99,97
			T93	0,8038	0,5844	0,0314	100,00
		0,6	T79	0,5643	1,0245	0,0758	99,99
			T105	1,3759	0,5574	0,0830	99,99
		0,9	T76	-0,5105	1,5003	0,0870	99,98
			T116	-0,2966	1,9788	0,0861	100,00
	3,33	0,3	T77	1,0820	0,2004	0,0354	99,99
			T120	0,9150	0,3202	0,0502	100,00
		0,6	T74	0,9278	0,5554	0,0789	100,00
			T124	-0,8245	1,5037	0,0823	99,98
		0,9	T73	-2,1940	1,8838	0,0901	99,86
			T132	-3,0899	2,0272	0,0823	99,69
40	10	0,3	T37	0,6616	0,3008	-0,0222	99,71
			T110	0,7229	0,3928	0,0166	99,90
		0,6	T38	0,0654	0,6722	0,0223	99,73
			T114	0,2245	0,9604	0,0173	99,89
		0,9	T82	-0,0406	1,2632	0,0662	99,95
			T113	-1,1403	1,6558	0,0611	99,87
	5	0,3	T96	0,7063	0,2219	0,0193	99,95
			T108	0,1233	0,5717	0,0017	99,91
		0,6	T63	0,4568	0,4874	0,0542	99,99
			T130	0,2570	0,6088	0,0473	99,99
		0,9	T127	0,1674	0,7205	0,0589	99,98
			T60	-0,9770	1,3992	0,0686	99,92
	3,33	0,3	T161	-0,0668	0,8550	0,0842	99,99
			T71	-0,0199	1,1126	0,0721	99,99
		0,6	T61	0,6427	0,2531	0,0226	99,99
			T103	-0,0841	0,5327	0,0093	99,88
		0,9	T158	0,3255	0,3832	0,0075	99,95
			T64	-0,3816	0,8991	0,0655	99,99
30	10	0,3	T94	0,2244	0,6100	0,0486	99,99
			T162	0,5283	0,4094	0,0684	100,00
		0,6	T62	-0,6277	0,8152	0,0740	99,98
			T92	0,2975	0,8486	0,0720	99,94
		0,9	T157	-1,6060	1,2196	0,0793	99,98
			T115	0,8537	0,0996	0,0566	99,83
	5	0,3	T156	0,7967	0,1287	0,0281	99,76
			T129	0,8485	0,2273	0,0589	99,89
		0,6	T155	0,9908	0,1105	0,0708	99,95
			T99	0,7519	0,3449	0,0553	99,87
		0,9	T165	0,6747	0,4069	0,0613	99,84
			T129a	0,4381	0,3332	0,0166	99,85
	3,33	0,3	T163	0,4985	0,2509	0,0218	99,77
			T130	0,4015	0,3858	0,0199	99,85
		0,6	T159	0,2924	0,3979	0,0453	99,88
			T128	0,0795	0,4589	0,0532	99,89
		0,9	T164	0,0277	0,4957	0,0681	99,91
			T117	-0,1524	0,5856	-0,0062	99,96
30	3,33	0,3	T153	0,7521	0,1483	0,0267	99,89
			T126	-1,6694	1,6072	0,0479	99,96
		0,6	T154	0,1324	0,4357	0,0406	99,82
			T100	-0,3749	0,6487	0,0635	99,89
		0,9	T160	-0,4490	0,6049	0,0566	99,73

Tabelle F1: Versuchsprogramm, Eigenschaften der Probekörper, Versuchsergebnisse – Triax (AB 0/11S)

Versuchsprogramm				Eigenschaften der PK			Versuchsergebnisse										
T	F	Spannung [MPa]	Probe- körper	ρ_A	H_{bit}	k	ϵ_{ax} nach 16.000 LW	ϵ_{ax} nach 100.000 LW	$\dot{\epsilon}_{ax}$ nach 16.000 LW	$\hat{\epsilon}_{ax}$	$\hat{\epsilon}_{rad}$	IEI- Modul $\sigma_{ax} / \epsilon_{ax}$	IEI- Modul, $\mu = 0,35$	Φ	μ	μ mit $\epsilon_{rad} / \epsilon_{ax}$	
[°C]	[Hz]	σ_{ax} σ_{rad}		[g/cm³]	[Vol.-%]	[%]	[%]	[%]	[%/LW]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[°]	[-]	[-]	
30	10	0,3	AB1803	2,412	2,7	100,5	3,040	4,140	-0,163	5,76E-05	0,3230	0,0311	884,69	645,21	6,42	1,78	0,097
			ABT23	2,407	3,0	100,3	1,630	2,120	-2,070	2,13E-05	0,1900	0,0923	1502,50	618,78	15,90	4,41	0,488
		0,6	AB1791	2,405	3,0	100,2	22,700	27,200	16,240	2,46E-04	0,5820	0,0289	1001,40	992,50	8,19	2,27	0,050
			AB1792	2,414	2,6	100,6	7,170	8,450	1,380	8,04E-05	0,5030	0,0878	1161,00	742,10	15,60	4,32	0,175
		0,8	ABT13	2,422	2,3	100,9	1,850	2,290	-3,249	1,84E-05	0,3430	0,1070	1717,20	668,31	22,40	6,23	0,312
			AB1793	2,417	2,5	100,7	5,470	6,950	1,350	7,73E-05	0,6050	0,0890	1295,80	769,02	16,00	4,44	0,147
		0,9	ABT12	2,403	3,1	100,1	5,480	6,530	-1,640	6,19E-05	0,6040	0,1220	1294,30	656,46	17,90	4,98	0,203
			AB1783	nicht gewogen			18,700	21,300	9,040	1,48E-04	0,7000	0,0176	1277,90	994,36	12,30	3,42	0,025
	5	1,0	AB1641	2,392	3,6	99,6	6,100	7,220	0,220	6,43E-05	0,680	0,0711	1313,90	830,61	16,50	4,58	0,105
			AB1581	2,397	3,3	99,9	45,020	-	-	8,41E-04	0,8683	0,1814	1140,93	1140,88	14,07	3,91	0,209
		0,15	AB2053	2,385	3,8	99,3	29,600	34,200	17,020	2,33E-04	0,7410	0,0172	1326,84	1218,44	12,41	3,45	0,023
			AB2052	2,405	3,0	100,2	21,100	24,600	12,700	1,79E-04	0,6800	0,0110	1453,36	1348,27	12,36	3,43	0,016
		0,3	AB39-3	2,416	2,6	100,6	20,170	23,080	9,925	1,42E-04	0,9409	0,0311	1043,86	929,17	11,49	3,19	0,033
			AB1253	2,404	3,1	100,1	21,990	24,900	10,799	1,34E-04	1,1243	0,0650	873,56	743,34	11,33	3,15	0,058
		0,6	AB9323	2,416	2,6	100,6	19,640	22,060	12,398	1,11E-04	0,9031	0,0928	1082,75	882,65	9,45	2,62	0,105
			AB1132	2,416	2,6	100,7	12,910	13,990	5,159	8,56E-05	0,8634	0,0478	1135,73	683,11	6,86	1,90	0,055
5	10	AB11	2,408	2,9	100,3	11,640	13,300	2,817	9,43E-05	0,8379	0,0444	1169,60	705,66	6,91	1,92	0,053	
		AB1133	2,411	2,8	100,4	12,900	14,760	4,731	9,51E-05	0,7162	0,0395	1364,93	814,92	6,01	1,67	0,053	
		AB1261	2,409	2,8	100,4	9,198	10,400	0,234	5,34E-05	0,8542	0,0270	1144,00	511,34	7,37	2,05	0,030	
		AB1263	2,403	3,1	100,1	11,998	13,800	0,929	8,69E-05	0,9094	0,0509	1073,96	448,68	5,70	1,58	0,055	
		AB9321	2,399	3,3	99,9	7,550	8,520	-	4,37E-05	0,7958	-	1226,42	506,82	4,77	1,33	0,143	
		AB1601	2,409	2,9	100,3	38,458	-	-	5,20E-04	1,0055	0,2189	996,56	996,45	15,83	8,80	0,216	
		AB1022	2,414	2,6	100,6	21,510	23,590	8,508	1,02E-04	0,9987	0,0160	987,92	783,11	10,07	5,60	0,013	
		AB12	2,417	2,5	100,7	14,990	16,990	8,011	9,72E-05	0,9182	0,0463	1077,73	843,80	10,46	5,81	0,052	
	3,33	1,0	AB1262	2,415	2,6	100,6	16,040	17,970	7,721	8,76E-05	0,9182	0,0254	1076,20	838,52	9,85	5,47	0,026
			AB9322	2,408	2,9	100,3	14,960	16,460	2,204	7,30E-05	0,9742	0,0625	1016,85	570,25	5,54	3,08	0,063
		0,6	AB1522	2,424	2,3	101,0	15,730	18,130	8,440	1,07E-04	0,8260	0,0514	1185,77	659,11	5,60	3,11	0,057
			AB1582	2,415	2,6	100,6	12,710	14,210	4,271	7,94E-05	0,8210	0,0631	1196,74	660,02	7,42	4,12	0,071
		0,9	AB1523	2,415	2,6	100,6	11,310	12,690	1,641	6,77E-05	0,8162	0,0802	1204,56	441,72	5,58	3,10	0,093
			AB1572	2,417	2,5	100,7	11,680	12,970	1,851	8,76E-05	0,8514	0,0419	1151,47	416,53	5,01	2,78	0,046
		0,01	AB1521	2,406	3,0	100,2	57,593	-	-	1,13E-03	0,9742	0,1843	1021,54	1021,10	15,59	12,99	0,188
			AB1551	2,419	2,4	100,8	19,850	22,130	9,038	1,12E-04	0,6837	0,0264	1451,63	1152,37	11,76	9,80	0,035

Tabelle F1 (fortgesetzt)

Versuchsprogramm				Eigenschaften der PK			Versuchsergebnisse											
T	f	Spannung [MPa]	Probe- körper	ρ_A	H_{bit}	k	ε_{ax} nach 16.000 LW	ε_{ax} nach 100.000 LW	ε_{rad} nach 100.000 LW	$\dot{\varepsilon}_{\text{ax}}$ nach 16.000 LW	$\hat{\varepsilon}_{\text{ax}}$	IEI- Modul $\sigma_{\text{ax}} / \varepsilon_{\text{ax}}$	IEI- Modul $\mu = 0,35$	Φ	Φ	μ $\varepsilon_{\text{rad}} / \varepsilon_{\text{ax}}$	μ mit $\sigma_{\text{rad}}, \sigma_{\text{ax}}$	
[°C]	[Hz]	σ_{ax}	σ_{rad}	[g/cm³]	[Vol.-%]	[%]	[‰]	[‰]	[‰]	[‰/LW]	[‰]	[MPa]	[MPa]	[°]	[ms]	[-]	[-]	
30	3,33	1,0	AB1513	2,416	2,6	100,6	14,940	16,270	4,423	8,49E-05	0,6383	0,0580	1557,41	874,25	9,33	7,78	0,097	0,415
			AB1541	2,411	2,8	100,4	12,200	13,200	3,319	6,37E-05	0,6252	0,0836	1590,29	894,21	10,01	8,35	0,130	0,423
			ABT33	2,421	2,4	100,8	11,470	12,460	3,663	6,09E-05	0,5886	0,1060	1687,97	960,66	9,68	8,07	0,177	0,433
			AB1542	2,417	2,6	100,7	7,430	8,020	0,993	2,98E-05	0,5671	0,0813	1752,88	687,14	7,78	6,49	0,139	0,478
			AB1553	2,416	2,6	100,6	8,460	9,500	1,129	3,66E-05	0,6006	0,1055	1655,08	648,46	7,40	6,17	0,173	0,480
			ABT11	2,403	3,1	100,1	10,140	10,990	1,284	4,57E-05	0,6379	0,0883	1558,21	659,09	6,48	5,40	0,135	0,469
	10	1,0	AB1573	2,408	2,9	100,3	60,000	-	-	-	1,5689	0,5629	628,15	628,10	15,64	4,35	0,359	0,359
			AB2031	2,381	4,0	99,2	34,100	48,000	28,310	4,07E-04	1,4422	0,2745	686,77	633,13	14,14	3,93	0,175	0,236
			AB2032	2,407	3,0	100,2	33,400	44,500	22,050	3,64E-04	1,5122	0,3328	655,38	613,24	14,11	3,92	0,178	0,235
			AB37-1	2,408	2,9	100,3	29,178	34,206	10,988	2,24E-04	1,8111	0,3734	545,11	443,58	10,25	2,85	0,205	0,339
			AB47-2	2,399	3,3	99,9	30,301	36,851	15,696	2,70E-04	1,9647	0,6518	502,19	419,79	11,68	3,24	0,332	0,405
			AB37-3	2,413	2,7	100,5	24,166	28,456	9,170	3,15E-04	1,7577	0,4336	559,94	455,04	10,94	3,04	0,244	0,357
50	5	1,0	AB66-1	2,408	2,9	100,3	34,740	41,514	15,212	2,90E-04	2,0646	0,4727	480,28	396,82	12,43	3,45	0,226	0,342
			AB37-2	2,402	3,2	100,1	15,972	19,029	3,739	1,41E-04	2,3895	0,6377	412,93	242,72	7,32	2,03	0,266	0,447
			AB47-1	2,402	3,2	100,0	22,882	-	-	1,68E-04	2,0365	0,5986	483,55	291,67	8,20	2,28	0,293	0,453
			AB16-3	2,421	2,4	100,8	19,688	23,565	7,488	1,79E-04	2,4038	0,7487	410,18	248,65	9,72	2,70	0,310	0,455
			AB13	2,399	3,3	99,9	19,654	25,099	3,848	1,63E-04	3,7874	1,8263	261,96	113,51	15,74	4,37	0,475	0,498
			AB1161	2,412	2,7	100,5	16,591	21,377	2,561	1,59E-04	3,5703	1,7303	284,61	106,74	18,76	5,21	0,466	0,496
	5	1,0	ABT41	2,412	2,7	100,5	17,395	21,265	5,390	1,36E-04	2,8846	1,5345	334,54	144,04	15,88	4,41	0,537	0,501
			AB1583	2,407	3,0	100,2	60,000	-	-	-	1,6562	0,6577	597,43	597,31	14,78	8,21	0,397	0,397
			AB26-2	2,399	3,3	100,0	27,620	32,571	9,845	2,18E-04	1,9372	0,4212	502,50	413,08	9,52	5,29	0,218	0,346
			AB1252	2,415	2,6	100,6	28,345	33,055	16,751	2,18E-04	1,7416	0,4167	561,35	450,97	10,34	5,75	0,238	0,365
			AB20-1	2,398	3,3	99,9	22,720	27,317	9,380	2,13E-04	1,7766	0,3807	549,11	447,45	9,41	5,23	0,214	0,346
			AB16-1	2,403	3,1	100,1	18,684	20,783	4,569	1,14E-04	1,8475	0,5056	532,52	309,95	6,68	3,71	0,274	0,452
30	3,33	1,0	AB39-2	2,404	3,1	100,1	14,337	16,761	4,243	1,26E-04	1,9444	0,4673	500,20	299,69	11,81	6,56	0,241	0,440
			AB26-3	2,422	2,4	100,9	26,503	29,199	9,534	1,41E-04	1,9863	0,5641	493,79	284,51	7,85	4,36	0,284	0,456
			AB 39-1	2,404	3,1	100,1	21,173	27,274	7,688	2,14E-04	4,2604	1,6943	236,16	94,51	13,43	7,46	0,390	0,492
			AB1023	2,396	3,4	99,8	24,453	28,173	6,477	1,61E-04	3,2296	1,5059	306,67	105,48	6,65	3,69	0,499	0,459
			ABT43	2,414	2,7	100,6	17,335	19,092	4,290	8,66E-05	1,7160	0,5902	568,58	216,08	9,78	5,43	0,493	0,344
			AB1603	2,397	3,4	99,8	60,000	-	-	-	1,7138	0,7000	576,62	576,49	15,23	12,69	0,408	0,409
	3,33	1,0	AB26-1	2,406	3,0	100,2	28,703	33,424	11,437	2,14E-04	1,7602	0,4337	556,27	445,25	9,16	7,63	0,245	0,372
			AB1251	2,413	2,7	100,5	24,825	28,762	14,652	1,84E-04	1,7431	0,3887	562,59	454,33	10,65	8,88	0,223	0,356
			AB20-2	2,414	2,7	100,5	23,353	27,373	11,604	1,87E-04	1,7694	0,4922	553,82	445,66	10,65	8,87	0,278	0,388
			AB1162	2,419	2,5	100,8	25,100	27,600	8,820	1,39E-04	1,6600	0,3710	590,00	394,00	9,06	7,55	0,223	0,413

Tabelle F1 (fortgesetzt)

Versuchsprogramm				Eigenschaften der PK			Versuchsergebnisse											
T	f	Spannung [MPa]	Probe-körper	ρ_A	H _{bit}	k	ε_{ax} nach 16.000 LW	ε_{ax} nach 100.000 LW	ε_{rad} nach 100.000 LW	$\dot{\varepsilon}_{ax}$ nach 16.000 LW	$\hat{\varepsilon}_{ax}$	$\hat{\varepsilon}_{rad}$	IEI-Modul $\sigma_{ax} / \varepsilon_{ax}$	IEI-Modul $\mu = 0,35$	Φ	Φ	μ $\varepsilon_{rad} / \varepsilon_{ax}$	μ mit $\sigma_{rad}, \sigma_{ax}$
[°C]	[Hz]	σ_{ax}	σ_{rad}	[g/cm ³]	[Vol.-%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%/LW]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[°]	[ms]	[-]	[-]
50	3,33	1,0	0,6	2,409	2,9	100,3	26,575	-	-	1,77E-04	1,8375	0,3124	536,24	297,66	7,54	6,28	0,169	0,435
				2,419	2,4	100,8	35,206	40,725	13,486	2,93E-04	1,5829	0,4294	617,29	395,90	4,16	3,47	0,270	0,437
				2,420	2,4	100,8	27,144	29,518	10,908	1,16E-04	1,9698	0,5585	498,19	281,67	9,48	7,90	0,283	0,458
				2,404	3,0	100,2	22,840	24,519	4,708	9,70E-05	1,8232	0,3806	539,63	305,70	8,24	6,87	0,209	0,441
		0,9		2,397	3,4	99,8	21,075	25,800	4,800	2,05E-04	2,6384	1,0079	381,87	127,36	5,16	4,30	0,380	0,492
				2,403	3,1	100,1	18,508	19,886	4,890	5,36E-05	1,4988	0,2915	660,66	229,94	8,17	6,81	0,192	0,491
				2,422	2,3	100,9	18,915	20,517	8,433	7,96E-05	1,4532	0,4504	682,33	254,10	9,85	8,21	0,310	0,492

Tabelle F2: Versuchsprogramm, Eigenschaften der Probekörper, Versuchsergebnisse – Triax (SMA 01/15, SMA I)

Versuchsprogramm				Eigenschaften der PK				Versuchsergebnisse											
T	f	Spannung [MPa]	Probe- körper	ρ_A	H_{bit}	k	ε_{ax} nach 16.000 LW	ε_{ax} nach 100.000 LW	ε_{rad} nach 100.000 LW	$\dot{\varepsilon}_{ax}$ nach 16.000 LW	$\hat{\varepsilon}_{ax}$	IEI- Modul $\sigma_{ax} / \varepsilon_{ax}$	IEI- Modul $\mu = 0,35$	Φ	Φ	μ $\varepsilon_{rad} / \varepsilon_{ax}$	μ mit $\sigma_{rad}, \sigma_{ax}$		
[°C]	[Hz]	σ_{ax}	σ_{rad}	[g/cm³]	[Vol.-%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%/LW]	[%]	[MPa]	[MPa]	[°]	[ms]	[-]	[-]		
30	10	1,0	0,15	ST11	2,535	2,8	100,3	20,700	25,900	2,250	2,87E-04	0,7006	0,0151	1400,74	1302,48	9,92	2,76	0,022	0,111
				S2041	2,496	4,3	98,8	26,300	32,700	14,320	3,59E-04	0,7099	0,0078	1380,63	1273,07	11,15	3,10	0,011	0,110
				S2012	2,526	3,1	100,0	19,600	24,600	13,570	2,50E-04	0,8010	0,0273	1230,70	1144,22	11,31	3,14	0,034	0,121
				S2013	2,501	4,1	99,0	21,100	26,800	11,400	3,02E-04	0,7631	0,0129	1289,80	1165,76	11,05	3,07	0,017	0,136
			S1182	2,517	3,5	99,6	23,880	26,461	7,341	2,02E-04	1,1225	0,0426	889,33	745,78	9,85	2,74	0,038	0,216	
			S1392	2,509	3,8	99,3	16,550	19,054	6,358	1,30E-04	0,9732	0,0684	1027,92	828,50	8,83	2,45	0,068	0,251	
			S1602	2,527	3,1	100,0	19,700	22,707	8,916	1,57E-04	1,0675	0,0270	934,24	751,92	9,07	2,52	0,025	0,226	
			S1902	2,5204	3,4	99,8	19,750	22,732	8,999	1,56E-04	1,0836	0,1340	923,82	761,91	8,72	2,42	0,012	0,274	
		0,45	S2032	2,520	3,4	99,7	9,280	11,200	3,130	1,16E-04	0,6899	0,0404	1422,20	1003,32	7,51	2,09	0,059	0,326	
			S2042	2,52	3,4	99,7	11,400	12,900	1,680	9,79E-05	0,7684	0,0256	1278,89	929,79	7,98	2,22	0,033	0,299	
			S139-1	2,507	3,9	99,2	14,030	15,812	1,503	1,15E-04	0,9422	0,0588	1050,37	622,29	5,91	1,64	0,066	0,391	
			S125-1	2,532	2,9	100,2	9,740	11,968	1,276	1,21E-04	0,8748	0,0558	1123,66	683,47	5,16	1,43	0,066	0,383	
		0,6	S186-2	2,536	2,7	100,4	4,270	5,815	0,712	7,02E-05	0,9685	0,0816	1015,14	666,93	7,13	1,98	0,085	0,366	
			S158-3	2,547	2,4	100,8	-	-	-	-	-	0,9219	0,0897	1064,90	624,58	12,30	3,42	0,095	0,403

Tabelle F2 (fortgesetzt)

Versuchsprogramm				Eigenschaften der PK				Versuchsergebnisse										
T	f	Spannung [MPa]	Probe- körper	ρA	H _{bit}	k	ε _{ax} nach 16.000 LW	ε _{ax} nach 100.000 LW	ε _{rad} nach 100.000 LW	ε̇ _{ax} nach 16.000 LW	ε̂ _{ax}	ε̂ _{rad}	IEI- Modul σ _{ax} / ε _{ax}	IEI- Modul μ = 0,35	Φ	Φ	μ ε _{rad} / ε _{ax}	μ mit σ _{rad} , σ _{ax}
[°C]	[Hz]	σ _{ax}	σ _{rad}	[g/cm³]	[Vol.-%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%/LW]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[°]	[ms]	[-]	[-]
30	10	1,0	S158-2	2,531	3,0	100,2	5,660	-	-	4,57E-05	0,9602	0,1422	1030,71	424,85	-	-	0,148	0,473
			S159-3	2,524	3,2	99,9	6,520	7,407	-2,509	4,74E-05	1,0936	0,1245	897,72	355,52	2,66	0,74	0,114	0,474
			S183-3	2,535	2,8	100,3	5,010	6,363	-1,116	6,77E-05	0,6756	0,1115	1517,67	628,19	4,01	1,11	0,175	0,475
	5	1,0	S156-3	2,547	2,3	100,8	16,120	17,636	6,986	1,33E-04	0,9581	0,0212	1031,68	827,71	9,84	5,47	0,024	0,237
			S1591	2,533	2,9	100,3	16,660	18,644	6,063	1,06E-04	1,0825	0,0308	911,85	740,82	8,28	4,60	0,032	0,233
			S160-3	2,539	2,6	100,5	20,980	22,477	9,747	2,01E-04	0,9815	0,0505	993,09	800,77	8,90	4,94	0,089	0,275
			S1603 n	2,522	3,3	99,8	23,320	26,333	10,539	1,72E-04	1,0044	0,0478	977,77	781,14	9,29	5,16	0,050	0,256
			S155-2	2,545	2,4	100,7	11,610	13,435	2,879	9,84E-05	0,9326	0,0455	1056,55	621,68	6,38	3,54	0,053	0,388
			S125-3	2,551	2,2	101,0	8,490	9,374	1,273	5,65E-05	0,8525	0,0808	1150,10	639,92	6,36	3,53	0,106	0,418
			S183-2	2,549	2,2	100,9	10,180	12,099	2,774	1,15E-04	0,6735	0,1205	1456,51	800,51	4,88	2,71	0,192	0,442
			S125-2	2,544	2,5	100,7	15,350	16,273	-0,081	4,76E-05	1,0442	0,1510	955,81	358,90	2,74	1,52	0,146	0,482
			S107-3	nicht gewogen			7,380	8,118	0,109	3,64E-05	0,9936	0,0950	977,94	370,58	-	-	0,100	0,478
			S185-2	2,560	1,8	101,3	9,140	10,389	0,572	5,56E-05	1,0890	0,1471	894,02	335,57	-	-	0,139	0,482
			S155-3	2,548	2,4	100,7	19,440	21,865	9,437	1,32E-04	1,0625	0,0135	932,24	744,94	9,46	7,88	0,012	0,231
3,33	1,0	S155-1	2,542	2,5	100,6	25,320	29,285	11,070	2,18E-04	1,0361	0,0156	956,69	768,27	10,05	8,38	0,014	0,229	
		S149-3	2,544	2,5	100,7	17,970	20,464	12,137	1,27E-04	1,0431	0,1463	949,05	742,61	7,87	6,56	0,139	0,322	
		S152-1	2,573	1,4	101,8	9,740	10,384	1,377	3,73E-05	0,9348	0,0221	1054,81	590,04	7,61	6,34	0,024	0,394	
		S158-1	2,540	2,6	100,5	15,430	17,202	4,778	1,01E-04	1,0282	0,0504	956,52	556,13	6,67	5,56	0,050	0,391	
		S188-2	2,538	2,7	100,4	15,900	17,984	3,393	1,15E-04	0,9643	0,0657	1017,34	549,59	5,07	4,23	0,071	0,416	
50	1,0	S156-2	2,526	3,2	100,0	-	9,132	-1,738	-	0,8195	0,2321	1200,64	445,25	3,46	2,88	0,284	0,489	
		S159-2	2,524	3,2	99,9	6,430	7,188	-1,483	3,60E-05	0,9161	0,1849	1079,96	392,10	2,36	1,97	0,202	0,488	
		S185-1	2,541	2,6	100,6	5,770	6,469	-1,591	3,34E-05	0,6022	0,1860	1683,99	605,98	-	-	0,321	0,494	
		S2053	2,505	4,0	99,1	32,700	37,100	20,150	1,70E-04	1,3917	0,2837	709,06	662,97	11,69	3,25	0,203	0,262	
		S2051	2,498	4,2	98,9	24,500	28,600	15,070	1,65E-04	1,3445	0,3141	735,64	688,13	11,28	3,13	0,233	0,287	

■ Probekörper wurde radial gestaucht

Tabelle F2 (fortgesetzt)

Versuchsprogramm				Eigenschaften der PK			Versuchsergebnisse											
T	f	Spannung [MPa]	Probe- körper	ρ_A	H _{bit}	k	ε_{ax} nach 16.000 LW	ε_{ax} nach 100.000 LW	ε_{rad} nach 100.000 LW	$\dot{\varepsilon}_{ax}$ nach 16.000 LW	$\hat{\varepsilon}_{ax}$	$\hat{\varepsilon}_{rad}$	IEI- Modul $\sigma_{ax} / \varepsilon_{ax}$	IEI- Modul $\mu = 0,35$	Φ	Φ	μ $\varepsilon_{rad} / \varepsilon_{ax}$	μ mit $\sigma_{rad}, \sigma_{ax}$
[°C]	[Hz]	σ_{ax}	σ_{rad}	[g/cm³]	[Vol.-%]	[%]	[‰]	[‰]	[‰]	[‰/LW]	[‰]	[‰]	[MPa]	[MPa]	[°]	[ms]	[-]	[-]
50	10	1,0	S185-3	2,525	3,2	99,9	9,550	10,972	-1,296	6,73E-05	2,7310	0,8045	377,23	159,99	3,08	0,86	0,303	0,485
			S183-1	2,535	2,8	100,3	10,170	10,725	-2,295	2,29E-05	3,1784	1,2155	333,21	140,91	9,60	2,67	0,374	0,491
			S184-3	2,538	2,7	100,4	11,240	12,697	-2,292	5,60E-06	3,7897	0,8332	278,26	116,39	9,44	2,62	0,223	0,479
		0,3	S157-1	2,541	2,6	100,6	25,750	27,793	12,838	9,41E-05	1,6138	0,1623	606,71	489,53	9,95	5,53	0,100	0,283
			S115-1	2,528	3,1	100,0	26,370	28,527	9,300	9,18E-05	1,5498	0,2048	634,32	513,06	9,09	5,05	0,133	0,302
			S184-1	2,541	2,6	100,6	30,660	32,962	14,623	1,12E-04	1,4182	0,3042	688,46	544,31	7,94	4,41	0,212	0,359
	5	1,0	S157-3	2,541	2,6	100,6	9,484	10,175	-0,148	3,34E-05	1,4384	0,1159	681,13	407,88	6,60	3,67	0,080	0,392
			S108-3	2,526	3,1	100,0	8,610	9,396	-0,701	2,94E-05	1,4266	0,0667	687,32	404,32	6,89	3,83	0,047	0,387
			S189-3	2,526	3,1	100,0	18,220	19,434	3,074	5,65E-05	1,3398	0,2136	728,54	425,81	4,87	2,71	0,167	0,425
			S182-2	2,556	2,0	101,1	16,950	18,132	2,568	6,70E-05	2,2652	0,7754	430,81	159,32	-	-	0,342	0,494
	0,9	S184-2	2,556	2,0	101,1	14,620	16,052	2,996	5,98E-05	2,1123	0,9387	460,19	171,11	-	-	0,440	0,498	
		S188-3	2,538	2,7	100,4	19,930	20,838	4,871	5,98E-05	1,5990	0,3666	595,81	235,69	4,49	2,49	0,236	0,484	
		S189-1	2,542	2,5	100,6	13,480	-	-	6,88E-05	1,6686	0,4401	588,64	250,98	-	-	0,267	0,481	
3,33		1,0	S157-2	2,533	2,9	100,2	23,350	25,260	8,818	7,53E-05	1,5379	0,1209	641,76	514,92	8,55	7,13	0,079	0,273
			S148-1	2,525	3,2	99,9	21,760	23,396	9,774	6,34E-05	1,4960	0,1249	658,90	528,83	8,34	6,95	0,084	0,275
			S190-3	2,525	3,2	99,9	8,350	10,600	3,181	9,41E-05	1,4403	0,2788	682,36	557,71	8,01	6,68	0,194	0,334
	1,0	S115-2	2,533	2,9	100,2	19,170	20,123	5,160	4,08E-05	1,4412	0,1634	689,27	407,01	5,28	4,40	0,115	0,407	
		S108-2	2,524	3,2	99,9	15,910	16,844	0,159	4,17E-05	1,4502	0,1984	685,05	403,41	5,66	4,72	0,135	0,414	
		S190-1	2,539	2,6	100,5	17,930	18,658	4,418	2,95E-05	1,5763	0,2642	623,67	350,77	2,44	2,03	0,163	0,431	
		S182-3	2,545	2,4	100,7	19,530	20,543	4,448	5,99E-05	1,5582	0,3410	627,70	233,58	-	-	0,221	0,487	
	0,9	S182-1	2,550	2,2	100,9	29,000	30,119	9,578	8,46E-05	1,5621	0,4539	630,73	235,29	-	-	0,290	0,491	
		S186-1	2,545	2,4	100,7	16,650	17,263	4,731	3,06E-05	1,3326	0,2301	744,57	271,68	2,91	2,43	0,174	0,486	

■ Probekörper wurde radial gestaucht

Tabelle F3: Versuchsprogramm, Eigenschaften der Probekörper, Versuchsergebnisse – Triax (SMA 0/11S, SMA II)

Versuchsprogramm				Eigenschaften der Probekörper			Versuchsergebnisse												
T	f	Spannung g [MPa]	Probekörper	ρ _A	H _{bit}	k	ε _{ax} nach 16.000 LW	ε _{ax} nach 100.000 LW	ε _{rad} nach 100.000 LW	ε̇ _{ax} nach 16.000 LW	ε̇ _{ax}	ε̂ _{ax}	ε̂ _{rad}	IEI-Modul σ _{ax} / ε _{ax}	IEI-Modul μ =0,35	Φ	Φ	μ ε _{rad} /ε _{ax}	μ mit σ _{rad} ,σ _a
[°C]	[Hz]	σ _{ax}	σ _{rad}	[g/cm³]	[Vol.-%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%/LW]	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[°]	[ms]	[-]	[-]
30	10	0,3	M2052	2,365	2,6	101,3	3,320	5,380	-0,310	7,61E-05	0,3090	0,0568	936,00	682,00	7,74	2,15	0,184	0,373	
			M2012	2,374	2,3	101,8	2,690	3,400	-2,117	3,01E-05	0,3850	0,1230	777,01	302,82	4,21	1,17	0,325	0,490	
			M2053	2,355	3,1	100,9	11,000	15,400	3,330	2,05E-04	0,5410	0,0752	1080,40	762,46	9,27	2,70	0,138	0,363	
		0,6	M2033	2,374	2,3	101,7	1,700	2,310	-3,980	2,43E-05	0,4770	0,1420	1227,50	405,51	3,84	1,07	0,297	0,497	
			M2042	2,365	2,6	101,4	12,600	16,400	5,210	1,82E-04	0,6730	0,0354	1327,30	1175,70	10,91	3,03	0,053	0,183	
		0,9	M662	2,380	2,0	102,0	7,130	10,200	1,170	1,36E-04	0,6730	0,0991	1324,00	717,15	4,83	1,34	0,147	0,434	
			M2023	2,373	2,3	101,7	22,100	30,491	17,067	3,70E-04	0,7714	0,0253	1273,93	1181,87	11,08	3,08	0,033	0,123	
		1,0	M2011	2,363	2,7	101,3	29,215	39,803	22,172	5,01E-04	0,7990	0,0225	1231,10	1141,68	11,39	3,16	0,028	0,119	
			M671	2,371	2,4	101,6	20,772	26,840	13,375	3,18E-04	0,8321	0,0680	1192,64	984,54	9,87	2,74	0,091	0,263	
			M672	2,374	2,3	101,7	16,347	21,001	9,102	2,49E-04	0,7911	0,0671	1274,34	1062,65	9,88	2,75	0,089	0,250	
50	10	0,6	M633	nicht gewogen			10,868	13,777	3,927	1,48E-04	0,8280	0,0810	1199,14	726,48	6,25	1,74	0,105	0,397	
			M661	2,369	2,5	101,5	13,426	17,760	6,400	2,25E-04	0,7874	0,0850	1263,55	760,89	6,22	1,73	0,115	0,402	
			M673	2,377	2,1	101,9	13,341	16,326	0,770	1,22E-04	0,8302	0,0591	1193,25	525,01	6,02	1,67	0,072	0,455	
		0,9	SM12	2,371	2,4	101,6	27,300	30,554	13,954	1,30E-04	1,5039	0,4035	655,32	545,58	11,15	3,10	0,265	0,369	
			SM21	2,356	3,0	101,0	29,500	34,277	18,750	2,08E-04	1,4772	0,3506	667,87	564,54	12,67	3,52	0,241	0,348	
			SM23	2,365	2,7	101,3	33,800	37,525	19,411	1,52E-04	1,3784	0,3859	717,30	602,39	10,99	3,05	0,179	0,374	
		1,0	SM13	2,366	2,6	101,4	24,800	27,744	13,450	1,39E-04	1,7657	0,6602	555,99	342,63	8,67	2,41	0,373	0,470	
			SM11	2,355	3,0	100,9	16,600	18,640	2,508	1,00E-04	1,8474	0,5234	531,69	331,57	8,49	2,36	0,283	0,445	
			SM22	2,369	2,5	101,5	12,200	13,523	-0,160	6,64E-05	1,8700	0,6661	516,62	230,69	7,47	2,07	0,347	0,486	
		0,9	M461	2,371	2,4	101,6	14,600	17,315	3,360	1,05E-04	2,7487	1,0146	362,40	159,36	11,31	3,14	0,369	0,489	

■ Probekörper wurde radial gestaucht

Tabelle F4: Versuchsprogramm, Eigenschaften der Probekörper, Versuchsergebnisse – Triax (OPA 0/8)

Versuchsprogramm				Eigenschaften der PK			Versuchsergebnisse											
T	f	Spannung [MPa]	Probe-körper	ρ _A	H _{bit}	k	ε _{ax} nach 16.000 LW	ε _{ax} nach 100.000 LW	ε _{rad} nach 100.000 LW	ε̇ _{ax} nach 16.000 LW	ε̇ _{ax} nach 100.000 LW	ε̇ _{rad}	IEI-Modul σ _{ax} / ε _{ax}	IEI-Modul μ = 0,35	Φ	Φ	μ mit ε _{rad} / ε _{ax}	μ mit σ _{rad} , σ _{ax}
[°C]	[Hz]	σ _{ax} σ _{rad}		[g/cm ³]	[Vol.-%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%/LW]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[°]	[ms]	[-]	[-]
30	10	0,15	OPA 672	1,881	22,0	104,3	49,300	54,201	29,930	2,31E-04	1,6508	0,1481	598,47	555,45	11,96	3,32	0,089	0,166
			OPA 661	1,919	20,5	106,4	32,800	36,433	18,063	1,66E-04	1,5596	0,1471	633,71	593,70	11,70	3,25	0,094	0,166
			OPA 431	1,900	21,2	105,4	41,700	45,500	18,474	1,97E-04	1,8940	0,1932	520,20	455,56	14,69	4,08	0,102	0,230
		1,0	OPA 543	1,886	21,8	104,6	36,560	38,902	13,014	9,94E-05	1,7661	0,2669	560,59	474,96	9,70	2,69	0,150	0,286
			OPA 541	1,902	21,2	105,5	25,304	27,799	4,228	1,07E-04	1,5941	0,2574	622,68	518,96	10,37	2,88	0,160	0,303
			OPA 641	1,924	20,2	106,7	19,735	21,693	5,527	8,94E-05	1,5223	0,2569	651,59	543,53	10,20	2,83	0,168	0,308
	5	0,45	OPA 461	1,887	21,8	104,6	21,014	23,507	0,667	8,94E-05	1,4984	0,2285	661,49	500,05	11,19	3,11	0,152	0,344
			OPA 432	1,942	19,5	107,7	17,000	18,581	0,558	1,01E-04	1,4350	0,1047	687,73	563,46	11,19	3,11	0,075	0,274
			OPA 651	1,928	20,1	106,9	7,693	8,849	-6,267	5,11E-05	1,4699	0,4495	676,20	461,19	9,92	2,76	0,317	0,448
		1,0	OPA 683	1,880	22,0	104,3	56,267	-	-	3,26E-04	1,7914	0,1411	577,15	527,41	11,18	6,21	0,082	0,180
			OPA 61	1,868	22,6	103,6	52,911	60,341	34,300	2,98E-04	1,6213	0,0854	604,56	551,14	10,43	5,79	0,052	0,156
			OPA 681	1,919	20,4	106,4	19,564	21,389	4,944	7,59E-05	1,5575	0,3039	628,75	508,69	9,60	5,33	0,195	0,339
3,3 3	1,0	OPA 663	1,876	22,2	104,1	33,556	36,361	10,346	1,23E-04	1,6057	0,2121	609,74	494,84	9,64	5,36	0,132	0,299	
		OPA 462	1,944	19,4	107,8	23,209	27,043	6,430	1,66E-04	1,4546	0,5704	672,87	514,55	10,29	5,72	0,390	0,453	
		OPA 782	1,920	20,4	106,5	20,899	23,080	3,942	8,97E-05	1,5059	0,6268	651,08	502,02	9,73	5,41	0,416	0,464	
	0,15	OPA 783	1,883	21,9	104,4	>60	-	40,341	-	1,7307	0,0867	570,05	516,25	10,94	9,12	0,062	0,171	
		OPA 762	1,943	19,4	107,8	18,010	20,055	4,847	8,68E-05	1,5999	0,1827	611,93	486,15	9,69	8,08	0,114	0,299	
		OPA 771	1,888	21,7	104,7	32,443	36,766	12,577	1,87E-04	1,5481	0,8370	632,88	453,77	7,86	6,55	0,541	0,513	
10	0,45	OPA 401	1,885	21,8	104,5	37,279	40,281	12,502	1,74E-04	1,5759	0,9924	625,85	456,55	8,90	7,42	0,633	0,538	
		OPA 643	1,871	22,4	103,8	33,510	36,862	12,539	1,20E-04	2,1815	0,2950	454,57	425,13	9,87	2,74	0,135	0,203	
		OPA 62	1,905	21,0	105,7	38,901	40,744	19,441	6,88E-05	1,9650	0,2311	506,16	479,95	11,56	3,21	0,117	0,175	
	1,0	OPA 671	1,921	20,3	106,6	13,366	14,417	-4,723	4,10E-05	1,7969	0,3009	554,33	466,36	7,49	2,08	0,168	0,302	
		OPA781n	1,925	20,2	106,8	20,803	22,334	2,472	4,81E-05	2,2453	0,2696	443,43	371,67	10,78	2,99	0,120	0,273	
		OPA681n	1,899	21,3	105,3	6,686	7,677	-8,210	3,65E-05	2,0182	0,6107	494,70	371,48	6,05	1,68	0,302	0,419	
50	0,45	OPA751	1,918	20,5	106,4	7,965	9,048	-10,916	3,62E-05	2,2831	0,3436	435,08	322,91	10,48	2,91	0,151	0,351	
		OPA673	1,887	21,8	104,7	2,457	2,906	-16,837	1,26E-05	2,0397	0,9408	488,97	316,93	7,25	2,01	0,463	0,489	
		OPA 693	1,870	22,5	103,7	31,079	35,114	10,070	1,23E-04	2,0103	0,2973	490,25	444,23	8,12	4,51	0,149	0,240	
	0,15	OPA 753	1,895	21,4	105,1	31,200	35,400	14,490	1,28E-04	2,1721	0,2553	454,21	413,69	11,70	6,50	0,117	0,211	
		OPA 942	1,889	21,7	104,8	12,784	13,941	-8,745	4,44E-05	1,9511	0,3689	504,39	418,52	7,00	3,89	0,190	0,324	
		OPA33	1,890	21,6	104,8	12,400	14,200	-13,815	5,01E-05	1,9162	0,4199	512,91	413,55	8,78	4,88	0,221	0,355	
0,45	OPA 662	1,863	22,8	103,3	9,057	10,458	-11,373	4,73E-05	1,9617	0,6903	499,73	356,73	5,49	3,05	0,352	0,448		
	OPA 888	1,937	19,7	107,4	10,700	12,500	-2,170	6,50E-05	1,7534	0,7171	559,36	413,97	8,63	4,79	0,413	0,466		
		0,6	OPA 542	1,927	20,1	106,9	3,846	4,542	-14,571	2,11E-05	1,8173	1,4812	543,24	323,56	3,69	2,05	0,816	0,550

■ Probekörper wurde radial gestaut

Tabelle F4 (fortgesetzt)

Versuchsprogramm			Eigenschaften der PK			Versuchsergebnisse									
T	f	Spannung [MPa]	Probe-körper	ρ_A	H _{bit}	k	ε_{ax} nach 16.000 LW	ε_{ax} nach 100.000 LW	$\dot{\varepsilon}_{ax}$ nach 16.000 LW	$\hat{\varepsilon}_{ax}$	$\hat{\varepsilon}_{rad}$	IEI-Modul $\sigma_{ax} / \varepsilon_{ax}$	IEI-Modul $\mu = 0,35$	Φ	μ mit $\varepsilon_{rad} / \varepsilon_{ax}$
[°C]	[Hz]	σ_{ax}	σ_{rad}	[g/cm³]	[Vol.-%]	[%]	[%]	[%]	[%/LW]	[‰]	[‰]	[MPa]	[MPa]	[°]	[-]
50	5	1,0	0,6	OPA 682	1,881	22,0	104,3	4,096	4,884	-16,405	2,68E-05	1,8814	0,8446	521,08	306,31
				OPA 652	1,883	22,0	104,4	30,498	35,060	13,372	1,49E-04	2,0090	0,1916	490,69	443,82
				OPA 412	1,918	20,5	106,4	25,200	29,700	8,591	1,21E-04	2,0315	0,4520	481,87	437,14
	3,33	1,0	0,3	OPA 692	1,879	22,1	104,2	13,767	15,654	-8,961	4,95E-05	1,9208	0,5867	513,96	413,98
				OPA 403	1,900	21,2	105,4	24,300	29,300	8,383	1,61E-04	1,8307	0,4987	452,19	7,63
				OPA 653	1,893	21,5	105,0	12,124	13,627	-4,169	5,39E-05	1,9456	0,5500	508,59	359,29
				OPA 64	1,915	20,6	106,2	5,648	5,648	-7,694	2,17E-05	1,7298	0,9657	570,57	337,47
				OPA 643n	1,865	22,7	103,4	6,382	7,246	-10,983	3,55E-05	1,9085	0,9019	520,49	303,04

■ Probekörper wurde radial gestaucht

Tabelle F5: Versuchsprogramm, Eigenschaften der Probekörper, Versuchsergebnisse – Triax (ABi 0/16S)

Versuchsprogramm			Eigenschaften der PK			Versuchsergebnisse									
T	f	Spannung [MPa]	Probe-körper	ρ_A	H _{bit}	k	ε_{ax} nach 16.000 LW	ε_{ax} nach 100.000 LW	$\dot{\varepsilon}_{ax}$ nach 16.000 LW	$\hat{\varepsilon}_{ax}$	$\hat{\varepsilon}_{rad}$	IEI-Modul $\sigma_{ax} / \varepsilon_{ax}$	IEI-Modul $\mu = 0,35$	Φ	μ mit $\varepsilon_{rad} / \varepsilon_{ax}$
[°C]	[Hz]	σ_{ax}	σ_{rad}	[g/cm³]	[Vol.-%]	[%]	[%]	[%]	[%/LW]	[‰]	[‰]	[MPa]	[MPa]	[°]	[-]
30	10	0,01	0,15	BM2043	2,419	3,8	100,1	28,723	44,723	26,741	4,66E-04	0,7043	0,0657	1402,94	12,03
				BM1553	2,414	4,0	99,9	15,151	20,190	10,848	2,30E-04	0,7050	0,0081	1318,89	10,99
				BM2011	2,377	5,4	98,4	15,942	21,576	10,895	2,25E-04	0,7630	0,0113	1195,70	11,39
		0,3	0,3	BM922	2,436	3,1	100,8	13,881	16,340	3,235	1,29E-04	0,7798	0,0254	1074,36	9,99
				BM1293	2,417	3,9	100,0	13,768	16,097	4,781	1,18E-04	0,7778	0,0206	1269,38	2,77
				BM1332	2,402	4,4	99,4	10,872	12,458	3,068	8,37E-05	0,7691	0,0274	1049,87	11,32
	5	1,0	0,3	BM1653	2,411	4,1	99,8	9,198	10,647	0,614	6,77E-05	0,8395	0,0333	970,64	2,77
				BM1291	2,422	3,6	100,2	8,411	9,301	0,305	5,39E-05	0,7458	0,0274	1333,61	11,56
				BM1341	2,392	4,8	99,0	7,508	8,826	-0,105	6,73E-05	0,7707	0,0701	787,78	8,66
				BM1241	2,408	4,2	99,7	9,153	10,170	-1,131	5,54E-05	0,7981	0,0381	1239,73	2,15
				BM923	2,392	4,9	99,0	20,885	23,891	8,699	1,66E-04	0,9447	0,0267	1032,20	6,46
				BM803	2,373	5,6	98,2	20,595	21,786	6,541	8,32E-05	0,9983	0,0370	976,22	10,10
				BM1263	2,369	5,8	98,0	20,930	22,757	9,987	2,04E-04	0,9414	0,0456	1041,87	12,27
				BM1512n	2,431	3,3	100,6	12,424	14,297	3,825	9,09E-05	0,8650	0,0261	1151,35	12,43

■ Probekörper wurde radial gestaucht

Tabelle F5 (fortgesetzt)

Versuchsprogramm				Eigenschaften der PK			Versuchsergebnisse												
T	f	Spannung [MPa]	Probe- körper	ρ_A	H _{bit}	k	ε_{ax} nach 16.000 LW	ε_{ax} nach 100.000 LW	$\dot{\varepsilon}_{ax}$ nach 16.000 LW	$\hat{\varepsilon}_{ax}$	$\hat{\varepsilon}_{rad}$	IEI- Modul $\sigma_{ax} / \varepsilon_{ax}$	IEI- Modul $\mu = 0,35$	Φ	Φ	μ $\varepsilon_{rad} / \varepsilon_{ax}$	μ mit $\sigma_{rad}, \sigma_{ax}$		
[°C]	[Hz]	σ_{ax}	σ_{rad}	[g/cm³]	[Vol- %]	[%]	[%]	[%]	[%/LW]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[°]	[ms]	[-]	[-]		
30	5	1,0	BM1272	2,432	3,3	100,6	7,919	8,691	1,197	4,55E-05	0,6522	0,0412	1503,06	873,05	8,50	4,72	0,071	0,398	
			BM1651	2,394	4,8	99,1	6,197	7,085	-1,548	4,06E-05	0,8132	0,0793	1213,99	685,08	7,74	4,30	0,099	0,413	
		0,9	BM1283	2,392	4,8	99,0	8,843	9,866	-1,049	4,78E-05	0,8296	0,0758	1175,17	456,67	8,47	4,70	0,092	0,475	
	3,33	1,0	BM931	2,413	4,0	99,8	17,766	21,041	6,906	1,51E-04	0,9556	0,0525	1025,55	810,76	10,69	8,91	0,056	0,266	
			BM1232	2,437	3,1	100,8	11,621	13,445	4,883	9,84E-05	0,8076	0,0159	1217,73	964,17	11,71	9,76	0,020	0,242	
			BM1342	2,422	3,7	100,2	12,425	14,194	4,822	9,64E-05	0,7000	0,0618	1415,79	1159,40	12,29	10,24	0,088	0,266	
			BM1261	2,365	5,9	97,9	12,663	14,762	1,514	1,03E-04	1,0539	0,1823	934,21	533,70	6,08	5,07	0,173	0,431	
			BM1281	2,386	5,1	98,7	7,625	8,599	-1,342	3,88E-05	0,8569	0,1095	1150,01	642,33	9,99	8,33	0,129	0,423	
			BM1502n	2,434	3,2	100,7	5,777	6,512	-0,782	3,25E-05	0,7960	0,1114	1247,60	707,74	8,42	7,01	0,140	0,423	
			0,9	BM1271	2,359	6,2	97,6	10,481	11,596	-1,623	5,66E-05	0,8039	0,1111	1227,73	441,65	8,00	6,66	0,138	0,486
10	1,0	0,02	BM732	2,407	4,3	99,6	58,100	-	-	1,82E-03	1,4258	0,3560	694,40	658,12	13,64	3,79	0,250	0,292	
			BM1493	2,408	4,2	99,6	25,482	32,560	18,492	2,56E-04	1,2794	0,1666	776,00	684,51	14,86	4,13	0,124	0,180	
		0,15	BM1491	2,406	4,3	99,5	24,815	31,235	17,803	2,39E-04	1,2647	0,1711	784,53	733,85	12,93	3,59	0,140	0,207	
			BM1513n	2,411	4,1	99,8	28,134	34,873	19,210	2,46E-04	1,3708	0,2845	724,73	687,12	14,11	3,92	0,221	0,251	
			BM563	2,410	4,1	99,7	19,413	22,107	6,912	1,15E-04	1,4537	0,2205	677,17	567,87	10,49	2,91	0,155	0,295	
		0,3	BM552	2,424	3,6	100,3	15,632	17,811	5,141	8,66E-05	1,4465	0,2718	680,91	573,06	10,13	2,81	0,186	0,313	
			BM731	2,396	4,7	99,1	13,702	16,586	3,067	9,98E-05	1,3846	0,3510	711,31	598,91	10,29	2,86	0,244	0,350	
			BM561	2,409	4,2	99,7	10,551	11,910	-0,616	5,69E-05	1,4263	0,3147	690,49	422,87	6,16	1,71	0,222	0,430	
		0,6	BM551	2,407	4,3	99,6	9,119	10,253	-2,625	4,79E-05	1,4315	0,2472	689,87	434,38	6,52	1,81	0,174	0,410	
			BM562	2,359	6,2	97,6	8,614	9,755	-1,338	4,76E-05	1,4478	0,2834	680,64	424,44	6,61	1,84	0,197	0,419	
50		0,9	BM662	2,405	4,3	99,5	6,078	6,837	-3,622	2,77E-05	1,3861	0,2610	711,77	330,53	6,25	1,74	0,190	0,464	
			BM742	2,415	4,0	99,9	9,806	10,753	-1,590	4,58E-05	1,4802	0,2558	665,56	312,13	8,25	2,29	0,171	0,461	
				BM661	2,383	5,2	98,6	11,010	13,824	4,175	1,03E-04	1,3896	0,1718	704,81	570,50	8,34	4,63	0,126	0,297
				BM901	2,410	4,2	99,7	14,471	17,175	6,351	1,08E-04	1,4842	0,2961	654,53	539,30	9,37	5,21	0,199	0,333
			0,3	BM802	2,401	4,5	99,3	11,710	14,521	2,037	1,02E-04	1,5179	0,2301	639,94	517,53	9,08	5,04	0,151	0,312
	5	1,0		BM903	2,410	4,2	99,7	21,324	24,021	10,150	1,14E-04	1,4575	0,2169	671,45	540,92	9,61	5,34	0,153	0,315
				BM553	2,410	4,2	99,7	14,084	15,388	0,612	5,86E-05	1,3803	0,2277	708,16	409,49	7,21	4,01	0,188	0,416
			0,6	BM942	2,434	3,2	100,7	11,212	12,388	1,597	5,30E-05	1,3228	0,2065	737,43	433,05	6,85	3,81	0,163	0,422
				BM941	2,418	3,8	100,0	14,778	16,109	1,733	5,84E-05	1,2880	0,1346	758,64	436,69	7,02	3,90	0,109	0,411
				BM801	2,374	5,6	98,2	8,870	10,870	-3,304	6,41E-05	1,4488	0,3104	675,18	394,34	7,03	3,91	0,216	0,437
		0,9	BM733	2,410	4,1	99,7	11,199	12,342	-1,532	4,64E-05	1,2945	0,1937	758,00	301,21	6,71	3,73	0,151	0,477	
3,33	1,0	0,3	BM743	2,415	3,9	99,9	16,060	18,802	5,688	9,91E-05	1,3482	0,1719	737,48	586,41	8,17	6,81	0,129	0,308	
			BM943	2,412	4,1	99,8	20,448	23,432	8,753	1,25E-04	1,5017	0,1958	659,02	522,11	9,21	7,67	0,131	0,311	

■ Probekörper wurde radial gestaucht

Tabelle F5 (fortgesetzt)

Versuchsprogramm				Eigenschaften der PK			Versuchsergebnisse											
T	f	Spannung [MPa]	Probe-körper	ρ_A	H _{bit}	k	ε_{ax} nach 16.000 LW	ε_{ax} nach 100.000 LW	ε_{rad} nach 100.000 LW	$\dot{\varepsilon}_{ax}$ nach 16.000 LW	$\hat{\varepsilon}_{ax}$	$\hat{\varepsilon}_{rad}$	IEI-Modul $\sigma_{ax} / \varepsilon_{ax}$	IEI-Modul $\mu = 0,35$	Φ	Φ	$\mu_{\varepsilon_{rad} / \varepsilon_{ax}}$	μ mit $\sigma_{rad}, \sigma_{ax}$
[°C]	[Hz]	σ_{ax}	σ_{rad}	[g/cm³]	[Vol.-%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%/LW]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[°]	[ms]	[-]	[-]
50	3,33	1,0	0,3	nicht gewogen			20,853	24,002	6,719	1,36E-04	1,4076	0,1685	701,82	556,45	9,21	7,67	0,120	0,304
				2,425	3,5	100,4	12,476	13,454	0,752	3,85E-05	1,2633	0,1901	783,06	442,53	6,65	5,54	0,156	0,429
				2,107	16,2	87,2	14,249	15,321	1,028	5,34E-05	1,2295	0,1065	805,59	454,46	6,26	5,22	0,089	0,410
				2,420	3,7	100,1	18,663	20,213	4,200	7,97E-05	1,2636	0,1140	780,55	435,81	8,08	6,73	0,092	0,414
		0,9	2,445	2,8	101,2	11,947	12,800	2,043	4,04E-05	1,1314	0,1784	879,44	330,46	5,44	4,53	0,160	0,483	
			2,422	3,7	100,2	7,665	8,426	-2,184	2,94E-05	1,2475	0,2024	796,76	295,11	5,93	4,94	0,163	0,484	

■ Probekörper wurde radial gestaucht

Tabelle F6: Versuchsprogramm, Eigenschaften der Probekörper, Versuchsergebnisse – Triax (ATS 0/32 CS)

Versuchsprogramm				Eigenschaften der PK				Versuchsergebnisse											
T	f	Spannung [MPa]	Probe- körper	ρ_A	H _{bit}	k	ε_{ax} nach 16.000 LW	ε_{ax} nach 100.000 LW	$\dot{\varepsilon}_{ax}$ nach 100.000 LW	$\dot{\varepsilon}_{ax}$ nach 16.000 LW	$\hat{\varepsilon}_{ax}$	$\hat{\varepsilon}_{rad}$	IEI- Modul $\sigma_{ax} / \varepsilon_{ax}$	IEI- Modul $\mu = 0,35$	Φ	Φ	μ $\varepsilon_{rad} / \varepsilon_{ax}$	μ mit $\sigma_{rad}, \sigma_{ax}$	
[°C]	[Hz]	σ_{ax}	σ_{rad}	[g/cm³]	[Vol.- %]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]/LW]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[°]	[ms]	[-]	[-]	
30	10	1,0	0,01	T1092	2,404	5,5	100,5	26,271	-	-	7,09E-04	0,6540	0,0404	1502,50	1502,42	11,12	3,09	0,062	0,062
				T352	2,446	3,9	102,3	12,423	15,230	7,012	1,35E-04	0,7624	0,0162	1300,40	1219,55	10,64	2,95	0,021	0,100
				T321	2,451	3,7	102,5	14,415	21,776	7,709	1,25E-04	0,8077	0,0271	1221,69	1143,58	11,32	3,14	0,029	0,108
				T1113	2,378	6,6	99,5	25,643	32,667	15,342	3,13E-04	0,7957	0,0152	1235,92	1141,39	10,11	2,81	0,019	0,115
				T441	2,391	6,0	100,0	15,012	17,771	4,000	1,26E-04	0,8303	0,0554	1201,12	998,15	10,12	2,81	0,065	0,241
				T442	2,405	5,5	100,6	12,722	14,942	4,242	1,08E-04	0,7812	0,0674	1280,45	1061,78	9,94	2,76	0,089	0,248
				T502	2,398	5,8	100,3	9,514	11,691	2,004	1,05E-04	0,6947	0,0749	1416,50	1175,34	9,78	2,72	0,111	0,258
				T512	2,386	6,3	99,8	10,709	12,799	0,842	1,05E-04	0,7152	0,0471	1377,05	1144,66	9,87	2,74	0,070	0,243
	T1781	2,382	6,4	99,6	14,376	-	-	-	1,27E-04	0,6548	0,0662	1499,57	1073,54	8,47	2,35	0,101	0,341		
	T443	nicht gewogen			9,302	10,333	-1,944	5,64E-05	0,6947	0,2003	1436,99	768,25	7,66	2,13	0,289	0,465			
	T483	2,375	6,7	99,3	5,964	7,227	-6,761	5,52E-05	0,6428	0,1211	1553,78	936,49	7,83	2,17	0,191	0,425			
	T531	2,386	6,3	99,8	4,964	5,855	-5,141	4,22E-05	0,7107	0,4914	1406,41	851,97	7,26	2,02	0,137	0,430			
	5	1,0	0,15	T1112	2,384	6,3	99,7	22,788	31,300	14,291	3,03E-04	0,8234	0,0076	1198,49	1091,83	11,51	6,40	0,009	0,121
				T1111	2,371	6,9	99,1	23,503	34,633	22,525	3,79E-04	0,9014	0,0134	1092,98	993,74	11,21	6,23	0,015	0,128
				T1282	2,402	5,6	100,5	16,882	22,646	10,049	2,06E-04	0,7783	0,0193	1261,34	1145,80	10,61	5,90	0,025	0,137
				T472	2,411	5,2	100,9	13,638	-	-	1,03E-04	0,7146	0,0842	1379,53	1089,38	10,03	5,57	0,076	0,298
				T473	2,398	5,8	100,3	18,665	21,964	6,147	1,56E-04	0,7413	0,0399	1323,59	1042,21	10,12	5,62	0,055	0,268
				T513	2,363	7,1	98,8	14,725	17,951	5,785	1,35E-04	0,7707	0,0746	1281,64	1010,72	10,54	5,86	0,054	0,278

Tabelle F6 (fortgesetzt)

Versuchsprogramm				Eigenschaften der PK				Versuchsergebnisse											
T	f	Spannung [MPa]	Probe- körper	ρ_A	H _{bit}	k	ε_{ax} nach 16.000 LW	ε_{ax} nach 100.000 LW	ε_{rad} nach 100.000 LW	$\hat{\varepsilon}_{ax}$ nach 16.000 LW	$\hat{\varepsilon}_{ax}$	$\hat{\varepsilon}_{rad}$	IEI- Modul $\sigma_{ax} / \varepsilon_{ax}$	IEI- Modul $\mu = 0,35$	Φ	Φ	μ $\varepsilon_{rad} / \varepsilon_{ax}$	μ mit $\sigma_{rad}, \sigma_{ax}$	
[°C]	[Hz]	σ_{ax}	σ_{rad}	[g/cm³]	[Vol.-%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[°]	[ms]	[-]	[-]	
30	5	1,0	0,45	T1491	2,367	7,0	99,0	14,559	16,657	-4,843	9,51E-05	1,3051	0,1143	756,19	531,29	14,74	8,19	0,087	0,336
				T521	2,357	7,4	98,6	6,969	8,986	-7,003	7,86E-05	0,8282	0,1947	1221,93	674,38	8,61	4,78	0,242	0,452
		0,6		T493	2,391	6,1	100,0	5,787	7,048	-3,834	5,40E-05	0,7066	0,1425	1417,55	781,97	7,83	4,35	0,205	0,443
				T1123	2,368	6,9	99,1	28,693	40,356	19,902	3,98E-04	0,8913	0,0138	1105,15	1000,95	11,81	9,84	0,015	0,132
	3,33	1,0	0,15	T1372	2,396	5,9	100,2	16,207	21,287	9,906	1,90E-04	0,8501	0,0122	1158,58	1056,63	12,55	10,46	0,015	0,124
				T533	2,376	6,6	99,4	21,953	25,526	2,607	1,71E-04	0,7881	0,3665	1262,69	968,91	10,24	8,54	0,464	0,485
				T503	2,383	6,4	99,7	24,380	28,951	4,591	2,01E-04	0,7785	0,1178	1276,99	982,52	10,27	8,56	0,152	0,333
				T511	2,372	6,8	99,2	24,896	29,132	8,273	1,91E-04	0,7854	0,0883	1262,06	969,09	10,40	8,66	0,113	0,316
		0,6	0,45	T1493	2,373	6,8	99,3	10,145	12,138	-0,268	7,82E-05	1,2496	0,0938	785,79	547,04	14,23	11,86	0,075	0,339
				T492	2,389	6,1	99,9	7,287	8,271	-2,001	4,67E-05	0,6832	0,1597	1458,15	781,49	7,29	6,07	0,234	0,454
				T443?	2,405	5,5	100,6	9,302	10,333	-1,944	5,64E-05	0,6941	0,1984	1433,72	766,40	7,64	6,37	0,286	0,465
				T522	2,375	6,7	99,3	5,599	6,859	-4,075	4,44E-05	0,7205	0,1843	1379,11	732,17	6,49	5,41	0,258	0,460
50	10	1,0	0,15	T62	2,452	3,7	102,6	25,783	33,180	17,918	2,23E-04	1,1429	0,2807	868,73	824,39	13,45	3,73	0,245	0,286
				T363	2,407	5,4	100,7	16,787	22,409	6,417	1,91E-04	1,1355	0,1545	885,05	841,59	11,62	3,23	0,136	0,190
				T491	2,35	7,7	98,3	20,040	26,118	2,892	2,07E-04	1,2245	0,1598	812,19	680,71	9,70	2,69	0,131	0,280
				T351	2,424	4,8	101,4	13,245	17,094	3,058	1,32E-04	1,1549	0,2184	861,57	716,81	10,56	2,93	0,182	0,317
	5	1,0	0,45	T1283	2,376	6,6	99,4	15,055	19,886	1,029	1,75E-04	1,2606	0,1945	790,40	562,21	7,75	2,15	0,154	0,368
				T471	2,382	6,4	99,6	7,365	9,789	-7,918	8,66E-05	1,0843	0,2519	911,81	558,65	6,77	1,88	0,232	0,434
				T353	2,433	4,4	101,8	4,953	6,493	-3,114	4,66E-05	1,0610	0,1692	913,75	561,15	7,19	2,00	0,159	0,411
				T1122	2,400	5,7	100,4	20,298	26,528	11,823	2,25E-04	0,9547	0,0262	1031,35	937,93	12,29	6,83	0,027	0,138
		0,6	0,15	T1373	2,381	6,5	99,6	34,011	43,323	17,269	3,99E-04	0,9481	0,0127	1034,90	944,70	12,44	6,91	0,013	0,122
				T532	2,395	5,9	100,2	19,910	26,413	6,993	2,23E-04	1,1969	0,1425	817,90	645,94	8,96	4,98	0,119	0,306
				T501	2,368	7,0	99,0	24,948	32,833	4,289	2,75E-04	1,1960	0,1917	821,12	651,25	9,00	5,00	0,164	0,329
				T1371	2,365	7,1	98,9	14,392	17,547	-0,569	1,47E-04	1,0796	0,1063	904,48	633,94	8,62	4,79	0,099	0,348
3,33	1,0	0,6	T1281	2,370	6,9	99,1	9,208	11,381	-5,617	9,17E-05	1,0982	0,2096	888,45	497,61	9,20	5,11	0,191	0,438	
			T1401	2,369	6,9	99,1	30,075	48,349	30,649	5,10E-04	0,9017	0,0657	1089,70	1005,21	12,33	10,28	0,072	0,129	
			T1402	2,380	6,5	99,5	23,166	34,956	21,371	3,61E-04	0,8575	0,0137	1147,97	1059,62	12,74	10,61	0,016	0,113	
			T362	2,432	4,4	101,7	15,544	21,880	5,459	2,28E-04	1,2056	0,2493	821,82	632,52	7,98	6,65	0,205	0,365	
0,3	1,0	0,3	T482	2,412	5,2	100,9	20,546	27,396	5,281	2,69E-04	1,1877	0,3295	834,04	641,29	7,54	6,29	0,279	0,402	
			T1232	2,407	5,4	100,7	9,454	11,628	-1,384	7,40E-05	1,0295	0,2123	955,73	663,07	9,17	7,64	0,206	0,398	
			T1222	2,395	5,9	100,2	2,518	4,576	-1,476	6,99E-05	0,9934	0,3103	992,20	550,23	5,83	4,85	0,313	0,467	

■ Probekörper wurde radial gestaucht

Tabelle G 1: Approximation axiale Dehnung ab dem 1. LW – Triax (AB 0/11 S) – 30 °C, $\sigma_{ax}=1,0$ MPa

T [°C]	f [Hz]	σ _{rad} [MPa]	Probe- körper	max. LW	Gleichung 4-18				Gleichung 4-17				Gleichung 4-19					
					ε ₀	a	k	R ²	S _{appr} /S _{orig.}	a	k	R ²	S _{appr} /S _{orig.}	A1	A2	A3	R ²	S _{appr} /S _{orig.}
10	0,3		AB39-3	149851	-705,4099	702,9677	0,0031	98,05	1,46	5,5533	0,1251	93,46	1,94	1,9983	0,7375	0,0855	94,47	2,15
			AB125-3	149851	-705,0950	704,5552	0,0031	97,18	1,25	6,9132	0,1126	92,48	1,61	3,1691	1,2569	0,0775	91,86	1,29
			AB9323	149851	-705,0972	704,6993	0,0028	96,51	2,06	6,2300	0,1113	91,41	2,63	2,5626	1,0028	0,0695	91,59	1,84
			AB1132	149851	-703,6061	701,3993	0,0020	97,63	1,40	3,1378	0,1314	92,52	1,90	1,0840	0,3512	0,0586	96,30	1,29
			AB11	149851	-703,1347	701,8474	0,0018	98,13	1,91	3,2622	0,1233	93,64	2,55	1,1436	0,2929	0,0596	97,73	1,96
			AB1133	149851	-703,8637	701,1566	0,0022	97,34	1,84	3,1886	0,1348	91,97	2,49	1,1284	0,3906	0,0596	94,78	1,61
0,9		AB1261	149851	-701,7623	702,1580	0,0012	97,24	1,22	3,1912	0,1038	92,74	1,55	1,1999	0,2657	0,0343	98,37	1,05	
		AB1263	149851	-702,2456	701,7796	0,0018	98,91	1,30	3,6932	0,1155	95,35	1,72	1,2961	0,3140	0,0592	98,65	1,35	
		AB9321	149851	-701,1402	700,9983	0,0011	97,25	1,71	2,4129	0,1110	92,53	2,21	1,0870	0,2023	0,0275	98,28	1,46	
		AB1022	149851	-613,6582	617,5612	0,0028	96,04	1,58	8,7241	0,0876	91,80	1,92	2,8347	1,5362	0,0575	92,22	1,24	
		AB12	149851	-490,0910	489,9335	0,0030	97,71	1,51	4,7952	0,1112	93,26	1,95	1,1268	0,4541	0,0644	97,11	1,64	
		AB1262	149851	-557,6495	558,3710	0,0027	96,44	1,43	5,5346	0,1036	91,63	1,81	1,2643	0,5392	0,0644	96,06	1,55	
5	0,6	AB9322	149851	-556,5177	559,4554	0,0021	97,23	1,52	6,1749	0,0863	93,50	1,86	1,5258	0,5652	0,0503	98,01	1,42	
		AB1522	149851	-558,4779	557,4961	0,0030	98,36	1,59	4,7143	0,1182	94,26	2,10	1,1937	0,6374	0,0603	94,04	1,39	
		AB1582	149851	-556,6539	557,9974	0,0020	97,17	1,68	4,7272	0,0968	92,96	2,10	1,1783	0,4065	0,0477	98,02	1,55	
		AB1523	149851	-557,3660	557,2780	0,0020	97,34	2,05	3,6354	0,1101	92,70	2,63	0,9817	0,3067	0,0488	97,71	1,93	
		AB1572	149851	-557,2722	557,3654	0,0020	96,66	1,95	3,8239	0,1077	91,73	2,48	0,9928	0,3277	0,0485	97,16	1,81	
		AB1551	116851	-693,2493	693,9014	0,0027	96,38	1,86	6,6304	0,1074	91,45	2,35	1,2953	0,7770	0,0729	94,41	2,27	
3,33	0,3	AB1552	116851	-818,5073	819,2118	0,0026	95,52	1,91	7,4313	0,1069	90,19	2,40	1,5494	1,0069	0,0767	92,40	2,50	
		AB132	116851	-818,7441	818,9564	0,0024	95,62	2,62	6,7111	0,1095	90,22	3,32	1,3216	0,8242	0,0747	92,87	3,29	
		AB1513	116851	-818,0267	817,7441	0,0018	94,75	2,87	4,6585	0,1122	88,88	3,64	0,8797	0,4397	0,0610	94,26	2,93	
		AB1541	116851	-817,6110	818,0981	0,0014	95,04	2,46	4,1037	0,1050	89,53	3,09	0,8775	0,3579	0,0463	96,00	2,23	
		AB133	116851	-817,7727	817,9247	0,0013	95,18	2,81	3,7241	0,1083	89,62	3,55	0,8436	0,3210	0,0448	96,05	2,53	
		AB1542	116851	-817,2065	817,9780	0,0008	94,15	2,51	2,7348	0,0967	88,65	3,09	0,8961	0,2389	0,0090	96,94	1,94	
0,9		AB1553	116851	-817,6836	817,5190	0,0010	97,02	1,46	2,6586	0,1136	92,11	1,89	0,8445	0,2187	0,0329	97,94	1,27	
		AB111	116851	-816,9751	818,2225	0,0011	93,10	2,23	3,8422	0,0942	87,46	2,71	0,9082	0,3333	0,0267	95,86	1,79	

■ höchstes Bestimmtheitsmaß bzw. geringste Abweichung der Steigung S_{appr} von S_{orig} .

Tabelle G 2: Approximation axiale Dehnung ab dem 100. LW – Triax (AB 0/11 S) – 30 °C, $\sigma_{ax}=1,0$ MPa

T [°C]	f [Hz]	Grad [MPa]	Probe- körper	max. LW	Gleichung 4-18				Gleichung 4-17				Gleichung 4-19					
					ε ₀	a	k	R ²	S _{appr} /S _{orig.}	a	k	R ²	S _{appr} /S _{orig.}	A1	A2	A3	R ²	S _{appr} /S _{orig}
30	10	0,3	AB39-3	149851	-705,1613	703,2164	0,0031	97,91	1,43	5,9685	0,1186	94,28	1,83	-3,1886	2,0148	0,0675	99,39	1,26
			AB125-3	149851	-704,6674	704,9830	0,0030	97,14	1,2	7,4714	0,1056	93,70	1,5	-5,1027	2,9840	0,0637	99,55	0,99
			AB9323	149851	-704,6632	705,1334	0,0027	96,45	1,97	6,7644	0,1038	92,69	2,44	-7,9281	3,9286	0,0141	97,21	0,96
			AB1132	149851	-703,4579	701,5474	0,0020	97,40	1,38	3,3879	0,1245	93,24	1,79	-0,5566	0,7719	0,0333	99,71	0,99
			AB11	149851	-703,0203	701,9617	0,0018	97,90	1,88	3,4874	0,1173	94,24	2,42	-0,1123	0,6676	0,0307	99,65	1,39
			AB1133	149851	-703,7447	701,2756	0,0021	96,98	1,81	3,4347	0,1281	92,37	2,36	-0,7720	0,8287	0,0392	99,33	1,32
	5	0,9	AB1261	149851	-701,5478	702,3725	0,0012	97,54	1,16	3,4532	0,0966	94,54	1,44	0,3133	0,5998	-0,0115	99,96	0,77
			AB1263	149851	-702,1472	701,8779	0,0017	98,80	1,28	3,9120	0,1103	96,04	1,64	0,2599	0,6228	0,0371	99,84	1,02
			AB9321	149851	-700,9941	701,1444	0,0010	97,21	1,65	2,6054	0,1040	93,76	2,07	0,3591	0,4921	-0,0270	99,90	1,06
			AB1022	149851	-613,1471	618,0724	0,0026	96,32	1,49	9,3753	0,0811	93,49	1,77	-7,2328	3,4908	0,0380	99,71	1,04
			AB1262	149851	-557,2383	558,7823	0,0025	96,73	1,36	6,0181	0,0960	93,47	1,67	-2,7594	1,5625	0,0287	99,87	0,92

Tabelle G2 (fortgesetzt)

T [°C]	f [Hz]	σ_{rad} [MPa]	Probe- körper	max. LW	Gleichung 4-18				Gleichung 4-17				Gleichung 4-19					
					ε_0	a	k	R ²	$S_{\text{appr}}/S_{\text{orig}}$	a	k	R ²	$S_{\text{appr}}/S_{\text{orig}}$	A1	A2	A3	R ²	$S_{\text{appr}}/S_{\text{orig}}$
30	5	0,3	AB12	149851	-489,8120	490,2125	0,0029	97,76	1,46	5,1669	0,1044	94,58	1,83	-1,6523	1,1377	0,0373	99,85	1,08
			AB9322	149851	-556,2377	559,7354	0,0020	97,38	1,45	6,5647	0,0807	94,86	1,73	-1,2651	1,3262	0,0154	99,84	0,99
			AB1522	149851	-558,2673	557,7067	0,0029	98,31	1,55	5,0502	0,1120	95,24	1,98	-1,7203	1,1252	0,0489	99,84	1,24
		AB1582	149851	-556,3554	558,2959	0,0019	97,60	1,60	5,0972	0,0899	94,88	1,94	-0,7521	0,9509	0,0110	99,96	1,09	
		AB1523	149851	-557,1630	557,4809	0,0019	97,25	1,98	3,9131	0,1034	93,79	2,46	-0,6583	0,7583	0,0108	99,80	1,34	
		AB1572	149851	-557,0357	557,6019	0,0019	96,53	1,87	4,1301	0,1007	92,85	2,31	-0,9432	0,8634	0,0054	99,64	1,22	
	3,33	0,3	AB1551	116851	-692,7634	694,3875	0,0026	96,43	1,77	7,2251	0,0994	93,02	2,16	-6,3348	2,4555	0,0446	99,68	1,26
			AB1552	116851	-817,8801	819,8390	0,0024	95,63	1,80	8,1562	0,0982	91,97	2,19	-9,7673	3,4406	0,0496	99,49	1,29
			AB132	116851	-818,2251	819,4754	0,0023	95,43	2,49	7,3374	0,1012	91,53	3,05	-7,6557	2,7701	0,0461	99,30	1,76
		AB1513	116851	-817,6541	818,1167	0,0017	94,23	2,73	5,1068	0,1037	89,79	3,34	-3,6943	1,5349	0,0122	99,25	1,67	
		AB1541	116851	-817,2860	818,4230	0,0013	94,80	2,33	4,4898	0,0966	90,86	2,82	-2,2629	1,1937	-0,0183	99,57	1,37	
		AB133	116851	-817,5014	818,1960	0,0013	94,70	2,68	4,0611	0,1003	90,55	3,27	-1,9241	1,0613	-0,0200	99,40	1,59	
0,9	AB1542	116851	-816,9754	818,2090	0,0007	94,19	2,34	3,0013	0,0880	90,45	2,79	-1,0306	0,9230	-0,1291	99,71	1,27		
	AB1553	116851	-817,5120	817,6907	0,0010	96,89	1,41	2,8850	0,1060	93,34	1,75	-0,4359	0,5967	-0,0234	99,81	0,9		
	AB111	116851	-816,6107	818,5868	0,0010	93,46	2,05	4,2482	0,0848	89,78	2,43	-2,4361	1,3686	-0,0973	99,78	1,08		

■ höchstes Bestimmtheitsmaß bzw. geringste Abweichung der Steigung S_{appr} von S_{orig}

Tabelle G 3: Approximation axiale Dehnung ab dem 1. LW – Triax (AB 0/11 S) – 50 °C, $\sigma_{\text{ax}}=1,0$ MPa

T [°C]	f [Hz]	σ_{rad} [MPa]	Probe- körper	max. LW	Gleichung 4-18				Gleichung 4-17				Gleichung 4-19				
					ε_0	a	k	R ²	$S_{\text{appr}}/S_{\text{orig}}$	a	k	R ²	$S_{\text{appr}}/S_{\text{orig}}$	A1	A2	A3	R ²
10	0,3	AB37-1	149851	-706,1046	708,7270	0,0038	99,94	1,07	10,4976	0,1031	98,32	1,39	8,8113	3,6218	0,0875	94,85	1,44
		AB47-2	149851	-706,2417	705,6710	0,0045	99,89	0,97	9,4704	0,1183	99,12	1,33	9,2052	3,8045	0,0935	94,43	1,71
		AB37-3	149851	-706,0999	702,2371	0,0039	99,18	1,44	6,2233	0,1333	96,41	1,99	4,9010	0,9278	0,0933	91,80	2,79
		AB66-1	149851	-706,2318	708,1738	0,0047	99,94	1,06	11,9224	0,1087	98,96	1,41	14,5220	6,0381	0,0981	95,00	2,92
		AB37-2	149851	-698,5960	698,7302	0,0023	99,94	1,0	5,2072	0,1131	98,64	1,35	1,8579	0,4961	0,0756	99,73	1,29
		AB47-1	67501	-699,1219	700,1122	0,0032	99,62	1,29	7,3373	0,1153	96,79	1,66	3,1224	1,1169	0,0919	98,11	1,82
50	0,6	AB16-3	149851	-699,4964	698,8626	0,0030	99,95	0,98	6,0983	0,1180	98,30	1,33	2,2895	0,7745	0,0852	98,83	1,52
		AB13	149851	-698,8295	697,0547	0,0032	99,08	0,63	5,6980	0,1285	99,45	0,9	2,3233	0,7376	0,0903	99,79	1,21
		AB1161	149851	-4,0765	6,9324	0,1128	99,41	0,69	4,1160	0,1431	99,34	0,74	1,7897	0,3947	0,0892	99,86	0,96
		AB141	149851	-130,6723	130,0789	0,0135	99,81	0,69	5,1502	0,1237	98,41	0,93	1,8387	0,5696	0,0831	99,44	1,0
		AB26-2	149851	-288,2652	289,8354	0,0088	99,97	0,96	9,2899	0,1095	98,49	1,26	3,8973	2,1220	0,0871	97,10	1,84
		AB125-2	149851	-377,7489	380,1691	0,0068	99,91	0,76	9,9808	0,1048	98,27	0,98	4,8226	2,7156	0,0841	96,10	1,16
5	0,3	AB20-1	149851	-372,0374	370,8858	0,0064	99,95	1,03	6,7307	0,1223	98,61	1,40	2,3836	1,2863	0,0801	95,94	1,31
		AB16-1	149851	-552,2478	554,8605	0,0028	97,88	1,86	7,1821	0,0934	94,10	2,32	2,0646	1,1113	0,0511	93,95	1,36
		AB39-2	149851	-553,2504	553,1855	0,0026	99,75	1,11	4,5712	0,1136	97,54	1,47	1,2352	0,3885	0,0661	99,42	1,29
		AB26-3	149851	-553,5004	560,7771	0,0034	98,45	1,34	11,9246	0,0786	95,73	1,62	4,4934	2,4143	0,0748	97,56	1,70
		AB 39-1	149701	-12,8303	15,6255	0,0818	99,63	0,75	5,7898	0,1347	99,38	0,86	1,8531	0,9156	0,0870	99,15	1,2
		AB1023	149701	-348,9959	352,7667	0,0058	99,99	1,01	9,4313	0,0954	99,94	1,24	3,2049	1,6467	0,0790	99,94	1,29
3,33	0,9	AB143	149701	-344,6826	349,3140	0,0036	99,95	1,23	7,7593	0,0792	99,88	1,48	2,2049	0,8147	0,0510	99,96	1,09
		AB125-1	116851	-472,8555	474,1684	0,0049	99,78	1,1	8,2812	0,1097	97,52	1,44	2,1228	1,3889	0,0820	97,44	1,74
		AB20-2	116851	-473,3712	473,6344	0,0049	99,91	1,07	7,3656	0,1156	97,93	1,42	1,7563	1,0765	0,0826	97,91	1,78

Tabelle G3 (fortgesetzt)

T [°C]	f [Hz]	σ_{rad} [MPa]	Probe- körper	max. LW	Gleichung 4-18				Gleichung 4-17				Gleichung 4-19					
					ε_0	a	k	R ²	$S_{\text{appr.}}/S_{\text{orig.}}$	a	k	R ²	$S_{\text{appr.}}/S_{\text{orig.}}$	A1	A2	A3	R ²	$S_{\text{appr.}}/S_{\text{orig.}}$
50		0,3	AB26-1	116851	-472,1202	473,9773	0,0056	99,84	1,15	9,7178	0,1087	97,78	1,49	3,5280	2,5776	0,0830	95,52	1,69
			AB66-2	27451	-518,4090	524,0662	0,0041	98,77	1,67	10,2707	0,0991	95,53	2,07	3,3568	2,2524	0,0766	96,89	1,57
			AB66-3	116851	-490,7464	493,8322	0,0064	99,90	0,96	12,1521	0,1064	98,18	1,24	8,9226	6,6244	0,0866	92,45	1,59
		AB47-3	116851	-601,4781	609,5391	0,0031	97,75	1,60	12,4373	0,0767	94,75	1,91	3,9643	2,7941	0,0696	96,77	1,72	
		AB20-3	116851	-600,9007	608,6613	0,0024	96,55	1,79	11,0628	0,0710	93,29	2,10	2,9356	2,3007	0,0457	93,86	1,27	
	3,33	0,9	AB1021	116851	-603,7557	605,0937	0,0034	99,34	0,63	7,0616	0,1130	99,44	0,85	1,9559	0,8095	0,0817	99,80	1,03
			AB1163	115801	-601,0192	607,4462	0,0019	96,19	1,39	9,0578	0,0699	92,85	1,63	2,0239	1,0424	0,0470	98,16	1,24
			AB1742	116851	-601,1172	607,6763	0,0020	96,74	0,98	9,2527	0,0703	93,61	1,16	2,0743	1,0929	0,0490	98,65	0,90

■ höchstes Bestimmtheitsmaß bzw. geringste Abweichung der Steigung S_{appr} von S_{orig} .

Tabelle G 4: Approximation axiale Dehnung ab dem 100. LW – Triax (AB 0/11 S) – 50 °C, $\sigma_{\text{ax}}=1,0 \text{ MPa}$

T [°C]	f [Hz]	σ_{rad} [MPa]	Probe- körper	max. LW	ε_0	Gleichung 4-18				Gleichung 4-17				Gleichung 4-19				
						a	k	R ²	$S_{\text{appr}}/S_{\text{orig}}$	a	k	R ²	$S_{\text{appr}}/S_{\text{orig}}$	A1	A2	A3	R ²	$S_{\text{appr}}/S_{\text{orig}}$
10	0,3	0,3	AB37-1	149851	-705,9605	708,8710	0,0038	99,99	1,06	10,9289	0,0995	99,20	1,34	-7,3508	6,0820	0,0864	99,62	1,43
			AB47-2	149851	-48,2766	51,8430	0,0430	99,99	1,09	9,7867	0,1153	99,64	1,30	-9,7679	6,5985	0,0931	99,35	1,71
			AB37-3	149851	-706,0999	702,2371	0,0039	99,07	1,44	6,5132	0,1292	96,62	1,93	-4,3670	2,7262	0,0853	98,01	1,80
		AB66-1	149851	-81,1418	86,2439	0,0306	99,98	1,14	12,3240	0,1057	99,59	1,36	-22,8996	13,5279	0,0939	99,04	1,88	
		AB37-2	149851	-698,5832	698,7398	0,0023	99,95	0,99	5,4063	0,1097	99,38	1,30	1,3123	0,6346	0,0717	99,88	1,17	
	0,6	AB47-1	67501	-698,8362	700,3979	0,0031	99,84	1,28	7,8365	0,1087	98,58	1,58	-0,8197	2,2029	0,0801	99,89	1,32	
		AB16-3	149851	-699,4598	698,8990	0,0029	99,98	0,98	6,3658	0,1141	99,08	1,28	0,0277	1,3096	0,0784	99,80	1,18	
		AB13	149851	-0,6163	6,2854	0,1219	99,90	0,87	5,8607	0,1259	99,90	0,88	1,5130	0,9158	0,0886	99,97	1,1	
		AB1161	149851	1,7400	3,1710	0,1583	99,57	0,76	4,2234	0,1407	99,56	0,73	1,7453	0,4074	0,0890	99,89	0,94	
		AB141	149851	-43,9337	44,8132	0,0326	99,87	0,72	5,4040	0,1193	99,38	0,89	0,8551	0,8121	0,0785	99,95	0,85	
5	0,3	AB26-2	149851	-288,2129	289,8877	0,0088	99,98	0,96	9,6367	0,1062	99,09	1,22	-8,3858	4,3868	0,0817	99,66	1,29	
		AB125-2	149851	-377,6697	380,2484	0,0067	99,92	0,76	10,3540	0,1015	98,91	0,95	-11,4214	5,4829	0,0791	99,48	0,91	
		AB20-1	149851	-372,1005	370,8224	0,0065	99,96	1,04	6,9697	0,1192	99,03	1,36	-2,8987	1,9720	0,0798	99,55	1,37	
		AB16-1	149851	-551,8901	555,2182	0,0027	98,22	1,78	7,6583	0,0876	95,84	2,16	-2,3682	1,8053	0,0451	99,66	1,4	
		AB39-2	149851	-553,1611	553,2747	0,0026	99,78	1,09	4,8008	0,1091	98,53	1,41	0,5744	0,5461	0,0597	99,69	1,12	
	0,6	AB26-3	149851	-553,1218	561,1558	0,0032	98,93	1,29	12,5028	0,0743	97,35	1,52	-8,1698	5,2554	0,0599	99,69	1,15	
		AB 39-1	149701	-0,4956	6,3066	0,1288	99,87	0,84	5,9758	0,1319	99,87	0,84	-0,1182	1,1858	0,0859	99,91	1,12	
		AB1023	149701	-348,8571	352,9055	0,0057	99,99	1,0	9,7914	0,0920	99,97	1,20	-3,7305	3,0028	0,0717	99,99	1,05	
		AB1743	149701	-344,3238	349,6729	0,0034	99,98	1,17	8,2401	0,0737	99,95	1,37	1,4520	0,9366	0,0510	99,99	1,13	
		AB26-1	116851	-471,9263	474,1714	0,0056	99,90	1,13	10,1940	0,1043	98,79	1,43	-11,8006	4,9777	0,0795	99,60	1,44	
3,33	0,3	AB125-1	116851	-472,6948	474,3292	0,0049	99,80	1,09	8,6929	0,1052	98,46	1,38	-5,8939	2,8894	0,0744	99,72	1,24	
		AB20-2	116851	-473,3012	473,7044	0,0048	99,90	1,07	7,7052	0,1114	98,68	1,37	-4,0436	2,1874	0,0751	99,71	1,25	
		AB66-2	27451	-518,0824	524,3928	0,0039	99,22	1,61	10,9161	0,0921	97,71	1,91	-5,5520	3,9865	0,0696	99,64	1,48	
		AB66-3	116851	-490,6278	493,9508	0,0064	99,90	0,95	12,6453	0,1027	98,91	1,19	-34,3992	12,2893	0,0846	99,04	1,41	
		AB47-3	116851	-601,0326	609,9845	0,0029	98,26	1,52	13,0992	0,0719	96,50	1,78	-13,0739	6,2218	0,0537	99,65	1,25	
	0,6	AB20-3	116851	-600,4494	609,1124	0,0023	97,36	1,68	11,7008	0,0657	95,46	1,94	-7,5314	4,1521	0,0303	99,77	1,19	
		AB1021	116851	-2,8577	9,4124	0,0968	99,89	0,8	7,2073	0,1111	99,88	0,83	1,2140	0,9501	0,0804	99,84	0,97	
		AB1163	115801	-600,6340	607,8314	0,0018	97,05	1,3	9,5939	0,0645	95,15	1,5	-2,8752	2,3264	0,0121	99,50	0,89	
		AB1742	116851	-600,6960	608,0973	0,0019	98,08	0,92	9,8255	0,0647	96,53	1,06	-2,0422	2,1725	0,0220	99,78	0,67	

Tabelle G5: Approximation des axialen Dehnungsverlaufes ab dem 100. LW – Triax (AB 0/11 S) – 30 und 50 °C

T [°C]	f [Hz]	Spannung		Probe- körper	max. LW	Gleichung 4-18						Gleichung 4-19			
		σ_{ax} [MPa]	σ_{rad} [MPa]			ϵ_0	a	k	b	c	R ²	A1	A2	A3	R ²
30		0,3	0,15	AB1803	149,851	-9,6887	7,8693	0,0490	0	0	99,24	0,8526	0,0251	0,0480	99,19
			0,3	AB123	149,851	-2,9554	2,592	0,0583	0	0	99,80	0,9976	-0,0074	0,0367	99,79
			0,03	AB1791	149,851	-913,347	908,81	0,003569	0	0	98,76	-2,5991	2,2013	0,0796	91,10
		0,6	0,3	AB1792	149,851	-251,583	249,01	0,0038	0	0	98,50	0,5003	0,2518	0,0030	99,18
			0,6	AB113	149,851	-248,09	247,64	0,00096	0	0	99,94	1,0284	0,0105	0,0240	99,97
			0,4	AB1793	149,851	-132,819	129,448	0,006695	0	0	99,52	0,6912	0,1174	0,0457	99,48
	10	0,8	0,6	AB112	149,851	-181,312	179,415	0,00402	0	0	99,01	0,6751	0,1835	0,0186	99,61
			0,2	AB1783	149,851	-680,99	677,826	0,00312	0	0	97,22	-2,5938	1,6172	0,0650	98,56
			0,5	AB1641	149,851	-235,592	233,166	0,00356	0	0	98,49	0,4939	0,2382	0,0173	99,49
		1,0	0,01	AB1581	45,301	-12,295	9,8054	0,1835	0,0201	1,54*10 ⁻⁴	99,82	-	-	-	-
			0,15	AB2053	149,851	-1050,95	1044,70	0,0034	0	0	98,20	-11,367	5,391	0,0936	97,79
			0,01	AB2052	149,851	-1050,23	1045,39	0,0025	0	0	98,68	-3,0065	1,873	0,0802	99,24
50	5	1,0	0,01	AB1601	80,851	-7,4511	9,2388	0,1668	0,0425	6,31*10 ⁻⁵	99,78	-	-	-	-
			0,01	AB1521	20,101	4,4008	1,0915	0,3727	-12,92	-0,0025	99,96	-	-	-	-
			0,01	AB1573	4,201	1,5643	7,4327	0,2377	0,41	8,32E-04	99,98	-	-	-	-
		1,0	0,15	AB2031	149,851	-6,7690	12,7220	0,1204	2,82	9,14E-06	99,95	-	-	-	-
			0,6	AB2032	149,851	-8,6104	14,5323	0,1087	-3,84	-8,82E-06	99,96	-	-	-	-
			0,01	AB1583	1,936	1,5646	7,1261	0,2583	0,61	1,46E-03	100,00	-	-	-	-
	3,33	1,0	0,01	AB1603	1,696	2,3776	8,0821	0,2476	1,71	1,23E-03	100,00	-	-	-	-
			0,45	AB1162	116,851	-276,342	284,478	0,0058	0	0	99,28	-5,1388	3,7759	0,05798	99,73

Tabelle G6: Approximation des radialen Dehnungsverlaufes – Triax (AB 0/11 S) – 30 und 50 °C

T [°C]	f [Hz]	Spannung		Probe- körper	ab dem Last- wechsel	Gleichung 4-18						Gleichung 4-19			
		σ_{ax} [MPa]	σ_{rad} [MPa]			ϵ_0	a	k	b	c	R ²	A1	A2	A3	R ²
30		0,3	0,15	AB1803	421	-4,6087	3,7224	0,0153	0	0	93,21	0,8951	-0,0228	0,0322	93,55
			0,3	AB123	100	-5,2727	5,6770	-0,05	0	0	99,86	0,9677	0,0099	-0,0518	99,84
			0,03	AB1791	100	-547,288	539,456	0,0038	0	0	99,10	-1,1662	0,7705	0,0596	98,25
		0,6	0,3	AB1792	211	2,037	-7,4858	-0,2158	0	0	96,17	0,6227	0,2351	-0,1327	95,65
			0,6	AB113	100	-245,247	245,506	-0,00126	0	0	99,66	0,9742	-0,0049	-0,0613	99,78
			0,4	AB1793	100	2,763	-5,2919	-0,1160	0	0	97,96	0,8097	0,1022	-0,0440	97,84
	10	0,8	0,6	AB112	100	-174,19	173,68	-0,00056	0	0	95,72	0,853	-0,0549	0,0595	99,83
			0,2	AB1783	100	-393,079	391,065	0,00247	0	0	94,26	-0,3283	0,5885	-0,02	98,92
			0,5	AB1641	6,151	-231,888	233,956	-0,00069	0	0	97,56	1,1544	-0,0839	0,0686	99,66
		1,0	0,01	AB1581	100	-60,922	0,1634	0,532	-41,01	-6,341	99,43	-	-	-	-
			0,15	Mittelwert	100	-253,872	250,304	0,0062	0	0	97,94	-0,604	0,7047	0,05	99,59
			0,3	Mittelwert	100	-10,301	11,812	0,052	0	0	92,07	-0,7268	0,8759	-0,0268	99,53
50		0,6	0,6	Mittelwert	100	-191,81	191,45	0,0021	0	0	87,80	-0,3199	0,8585	-0,3059	97,93
			0,9	Mittelwert	5,000	-17,153	19,021	-0,008	0	0	98,60	1,1657	-0,066	0,0493	99,57

Tabelle G6 (fortgesetzt)

T [°C]	f [Hz]	Spannung		Probe- körper	ab dem Last- wechsel	Gleichung 4-18						Gleichung 4-19			
		σ_{ax} [MPa]	σ_{rad} [MPa]			ϵ_0	a	k	b	c	R ²	A1	A2	A3	R ²
30	5	1,0	0,01	AB1601	100	6,034	0,4299	0,4007	0,01	0,00008	98,94	-	-	-	-
			0,3	Mittelwert	100	-225,859	226,863	0,0027	0	0	91,11	-1,7214	1,2273	-0,1866	99,54
			0,6	Mittelwert	100	-145,114	145,208	0,0029	0	0	94,77	0,0369	0,5427	-0,1455	99,71
	3,33	1,0	0,9	Mittelwert	100	1,837	-14,0306	-0,4621	0	0	97,32	-87,61	103,132	-70,793	95,11
			0,01	AB1521	100	-7,11	4,72	0,243	0,01	0,00028	99,71	-	-	-	-
			0,3	Mittelwert	100	-287,908	289,19	0,0025	0	0	88,45	-4,3193	1,9370	-0,2331	99,08
50	10	1,0	0,6	Mittelwert	100	-122,305	123,22	0,0022	0	0	76,20	0,3808	0,4769	-0,1747	89,65
			0,9	Mittelwert	2.000	-11,377	13,4288	-0,0059	0	0	85,03	1,3057	-0,0689	0,0490	91,15
			0,01	AB1573	100	13,372	0,287	0,592	0,00001	0,0035	99,72	-	-	-	-
	5	1,0	0,15	Mittelwert	100	4,595	1,189	0,248	0	0	99,83	-	-	-	-
			0,3	Mittelwert	100	-36,053	36,902	0,029	0	0	99,96	0,9920	0,4618	0,0600	99,71
			0,6	Mittelwert	100	-75,984	76,14	0,006	0	0	99,34	1,0947	0,1102	0,0156	99,54
50	5	1,0	0,9	Mittelwert	100	-0,3383	0,9314	0,1448	0	0	99,65	1,1487	-0,031	0,0638	99,70
			0,01	AB1583	100	14,908	0,1974	0,693	0,002	0,004	99,91	-	-	-	-
			0,3	Mittelwert	100	-142,581	143,126	0,0067	0	0	99,71	0,8739	0,3099	0,0428	99,85
	3,33	1,0	0,6	Mittelwert	100	-111,047	112,296	0,0043	0	0	97,56	0,7849	0,3056	-0,0262	99,22
			0,9	Mittelwert	100	-54,078	56,6404	0,0043	0	0	93,54	0,8147	0,5578	-0,1701	97,63
			0,01	AB1603	100	8,642	1,933	0,397	1,712	0,00123	99,97	-	-	-	-
50	3,33	1,0	0,3	Mittelwert	100	-224,498	224,695	0,0047	0	0	99,21	0,2136	0,4433	0,0355	99,82
			0,45	AB1162	100	-108,89	113,0	0,0037	0	0	91,95	-0,1882	1,045	-0,148	97,14
			0,6	Mittelwert	100	-82,124	86,8257	0,0032	0	0	81,90	-430,38	249,608	-58,837	96,57
			0,9	Mittelwert	100	-63,622	66,8986	0,0044	0	0	95,15	0,5680	0,7233	-0,1726	99,17

Tabelle G7: Approximation des axialen Dehnungsverlaufes ab dem 100 LW – Triax (SMA 0/11 S, SMA I) – 30 und 50 °C

T [°C]	f [Hz]	Spannung		Probe- körper	max. LW	Gleichung 4-18						Gleichung 4-19			
		σ_{ax} [MPa]	σ_{rad} [MPa]			ϵ_0	a	k	b	c	R ²	A1	A2	A3	R ²
30	10	1,0	0,15	Mittelwert	149,851	-678,02	663,86	0,0054	0	0	99,59	-3,3568	1,6817	0,0931	96,93
			0,3	Mittelwert	149,851	-673,07	669,30	0,0035	0	0	97,88	-2,7372	1,7579	0,0731	98,98
			0,45	Mittelwert	149,851	-670,25	665,82	0,0022	0	0	98,42	-0,0067	0,4342	0,0481	99,30
			0,6	Mittelwert	149,851	-670,84	666,87	0,0024	0	0	98,92	0,0305	0,4948	0,0568	99,38
			0,9	Mittelwert	149,851	-668,01	666,44	0,0011	0	0	99,67	0,8458	0,1512	0,0286	99,86
			0,3	Mittelwert	149,851	-673,69	670,04	0,0033	0	0	97,24	-2,6953	1,3206	0,0686	98,72
30	5	1,0	0,6	Mittelwert	149,851	-670,19	667,91	0,0018	0	0	98,82	0,0440	0,4070	0,0389	99,58
			0,9	Mittelwert	149,851	-668,51	669,56	0,0011	0	0	97,68	0,1971	0,5412	-0,0268	99,97
			0,3	Mittelwert	116,851	-675,32	671,82	0,0036	0	0	97,90	-4,5538	1,7437	0,0704	99,03
			0,6	Mittelwert	116,851	-671,19	671,16	0,0020	0	0	96,84	-1,8595	1,0307	0,0239	99,61
			0,9	Mittelwert	116,851	-669,02	669,09	0,0009	0	0	97,16	0,0877	0,4394	-0,0525	99,85
			0,15	Mittelwert	149,851	-678,02	663,86	0,0054	0	0	99,59	-3,3568	1,6817	0,0931	96,93
50	10	1,0	0,3	Mittelwert	149,851	-673,07	669,30	0,0035	0	0	97,88	-2,7372	1,7579	0,0731	98,98
			0,45	Mittelwert	149,851	-670,25	665,82	0,0022	0	0	98,42	-0,0067	0,4342	0,0481	99,30
			0,6	Mittelwert	149,851	-670,84	666,87	0,0024	0	0	98,92	0,0305	0,4948	0,0568	99,38
			0,9	Mittelwert	149,851	-668,01	666,44	0,0011	0	0	99,67	0,8458	0,1512	0,0286	99,86
			0,3	Mittelwert	149,851	-673,69	670,04	0,0033	0	0	97,24	-2,6953	1,3206	0,0686	98,72
			0,6	Mittelwert	149,851	-670,19	667,91	0,0018	0	0	98,82	0,0440	0,4070	0,0389	99,58

Tabelle G7 (fortgesetzt)

T [°C]	f [Hz]	Spannung		Probe- körper	max. LW	Gleichung 4-18					Gleichung 4-19				
		σ_{ax} [MPa]	σ_{rad} [MPa]			ϵ_0	a	k	b	c	R ²	A1	A2	A3	R ²
50	10	1,0	0,6	Mittelwert	149.851	-670,84	666,87	0,0024	0	0	98,92	0,0305	0,4948	0,0568	99,38
			0,9	Mittelwert	149.851	-668,01	666,44	0,0011	0	0	99,67	0,8458	0,1512	0,0286	99,86
			0,3	Mittelwert	149.851	-673,69	670,04	0,0033	0	0	97,24	-2,6953	1,3206	0,0686	98,72
	5	1,0	0,6	Mittelwert	149.851	-670,19	667,91	0,0018	0	0	98,82	0,0440	0,4070	0,0389	99,58
			0,9	Mittelwert	149.851	-668,51	669,56	0,0011	0	0	97,68	0,1971	0,5412	-0,0268	99,97
			0,3	Mittelwert	116.851	-675,32	671,82	0,0036	0	0	97,90	-4,5538	1,7437	0,0704	99,03
3,33	1,0	0,6	Mittelwert	116.851	-671,19	671,16	0,0020	0	0	96,84	-1,8595	1,0307	0,0239	99,61	
		0,9	Mittelwert	116.851	-669,02	669,09	0,0009	0	0	97,16	0,0877	0,4394	-0,0525	99,85	

Tabelle G8: Approximation des radialen Dehnungsverlaufes – Triax (SMA 0/11 S, SMA I) – 30 und 50 °C

T [°C]	f [Hz]	Spannung		Probe- körper	ab dem Last- wechsel	Gleichung 4-18					R ²	Gleichung 4-19				R ²
		σ _{ax} [MPa]	σ _{rad} [MPa]			ε ₀	a	k	b	c		A1	A2	A3		
30	10	1,0	0,15	Mittelwert	100	-670,75	662,09	0,0029	0	0	99,36	-0,1195	0,3519	0,0681	98,70	
			0,3	Mittelwert	100	-667,48	665,26	0,0014	0	0	94,09	-0,1990	0,5498	-0,0308	98,63	
			0,45	Mittelwert	100	-666,09	665,00	0,0006	0	0	89,95	0,2267	0,5042	-0,2015	96,83	
			0,6	Mittelwert	100	-664,97	664,25	0,0002	0	0	97,96	0,8779	0,0971	-0,0543	98,96	
			0,9	Mittelwert	100	-664,97	665,42	-0,0002	0	0	96,78	0,9673	-0,0650	0,0602	99,82	
			0,3	Mittelwert	100	-668,29	666,77	0,0013	0	0	91,12	-1,0631	0,7628	-0,0766	97,92	
	5	1,0	0,6	Mittelwert	100	-667,41	666,01	0,0006	0	0	96,34	0,4955	0,2307	-0,0742	98,82	
			0,9	Mittelwert	ab 2.000	-666,00	667,12	-0,0002	0	0	92,61	1,0703	-0,0854	0,0780	98,85	
			0,3	Mittelwert	100	-670,42	667,85	0,0017	0	0	95,30	-1,0411	0,6138	0,0013	99,03	
	3,33	1,0	0,6	Mittelwert	100	-667,80	668,07	0,0006	0	0	89,01	-1,5942	1,3296	-0,4678	97,91	
			0,9	Mittelwert	100	-666,56	667,23	-0,0003	0	0	96,00	1,1268	0,0107	-0,0580	94,31	
			0,15	Mittelwert	100	-660,88	664,05	0,0019	0	0	99,05	0,6562	1,0601	0,0397	99,94	
50	10	1,0	0,3	Mittelwert	100	-657,64	666,15	0,0008	0	0	90,95	-3,0913	4,4392	-0,3069	99,95	
			0,45	Mittelwert	ab 2.000	-656,03	660,69	-0,0003	0	0	99,40	1,9927	-0,0110	-0,0383	99,41	
			0,6	Mittelwert	100	-659,05	664,04	0,0004	0	0	66,55	-688,268	580,1112	-141,5004	94,22	
			0,9	Mittelwert	ab 500	-656,76	661,00	-0,0009	0	0	98,90	1,5565	-0,0624	-0,0477	98,89	
			0,3	Mittelwert	100	-658,72	665,92	0,0007	0	0	86,09	-18,5983	10,7529	-1,1329	99,47	
			0,6	Mittelwert	ab 2.000	-656,78	661,48	-0,0005	0	0	99,73	1,7861	-0,0702	0,0027	99,84	
	5	1,0	0,9	Mittelwert	ab 2.000	-655,50	661,58	-0,0004	0	0	94,69	2,0806	-0,1341	0,0528	96,45	
			0,3	Mittelwert	100	-656,28	662,64	0,0005	0	0	76,53	-3833,82	2042,0998	-342,5411	97,02	
			0,6	Mittelwert	ab 600	-654,17	662,17	-0,0006	0	0	98,63	2,6942	-0,1626	0,0381	99,74	
	3,33	1,0	0,9	Mittelwert	ab 2.000	-654,36	662,52	-0,0005	0	0	95,69	2,7847	-0,1878	0,0573	98,16	

Tabelle G9: Approximation des axialen Dehnungsverlaufes ab dem 100. LW – Triax (SMA 0/11 S, SMA II) – 30 und 50 °C

T [°C]	f [Hz]	Spannung		Probe- körper	max. LW	Gleichung 4-18					Gleichung 4-19				
		σ_{ax} [MPa]	σ_{rad} [MPa]			ϵ_0	a	k	b	c	R ²	A1	A2	A2	R ²
30		0,3	0,16	M2052	149.851	-1,468	0,7666	0,1899	0	0	99,77	0,9032	-0,0177	0,0744	99,63
			0,3	M2012	149.851	-17,252	16,5162	0,01939	0	0	99,96	0,9933	0,02699	0,0302	99,96
		0,6	0,3	M2053	149.851	-21,039	15,823	0,0724	0	0	99,57	0,1422	0,2893	0,0822	98,89
			0,6	M2033	149.851	-0,35	0,4933	0,1470	0	0	99,92	1,0455	-0,0386	0,05697	99,89
			0,2	M2042	149.851	-88,101	81,897	0,0212	0	0	99,77	-0,0107	0,4336	0,07697	99,28
	10	0,9	0,5	M662	149.851	-9,085	6,27	0,0978	0	0	99,97	0,6857	0,0897	0,0766	99,94
			0,15	Mittelwert	149.851	-49,08	36,91	0,0722	0	0	99,78	-8,3000	3,6800	0,0990	90,46
		1,0	0,3	Mittelwert	149.851	-91,78	81,77	0,0306	0	0	99,63	-1,0472	0,8273	0,0955	98,32
			0,6	Mittelwert	149.851	-80,33	72,85	0,0243	0	0	99,64	0,1612	0,3180	0,0836	99,18
			0,9	M673	149.851	-73,47	72,98	0,0180	0	0	99,98	1,2421	0,3637	0,0724	99,97
50	10	0,3	0,3	Mittelwert	149.851	-666,56	674,54	0,0033	0	0	99,36	-12,7048	9,6194	0,0731	99,90
			0,6	Mittelwert	149.851	-667,01	669,92	0,0026	0	0	98,22	-2,5721	2,5222	0,0545	99,89
		0,9	0,9	Mittelwert	149.851	-666,45	667,40	0,0019	0	0	99,08	0,4277	0,7595	0,0398	99,97
			0,9	Mittelwert	149.851	-666,45	667,40	0,0019	0	0	99,08	0,4277	0,7595	0,0398	99,97

Tabelle G10: Approximation des radialen Dehnungsverlaufes – Triax (SMA 0/11 S, SMA II) – 30 und 50 °C

T [°C]	f [Hz]	Spannung		Probe- körper	ab dem Last- wechsel	Gleichung 4-18					Gleichung 4-19				
		σ_{ax} [MPa]	σ_{rad} [MPa]			ϵ_0	a	k	b	c	R ²	A1	A2	A2	R ²
30		0,3	0,16	M2052	100	-0,968	0,0723	0,1917	0	0	96,47	0,8662	-0,04258	0,05448	96,22
			0,3	M2012	100	-96,139	96,305	-0,0021	0	0	99,71	0,9249	-0,0306	0,0104	99,94
		0,6	0,3	M2053	100	-15,759	12,667	0,0357	0	0	98,98	0,7113	0,0297	0,0459	98,91
			0,6	M2033	100	-792,04	793,89	-0,0063	0	0	97,09	0,9139	-0,0643	0,0428	99,90
			0,2	M2042	100	-189,80	186,34	0,00397	0	0	98,83	0,6043	0,1165	0,0297	99,03
	10	0,9	0,5	M662	100	-4,0386	1,858	0,0895	0	0	99,45	0,746	-0,00825	0,0482	99,42
			0,15	Mittelwert	100	-19,77	12,39	0,1013	0	0	99,69	-0,1346	0,3311	0,0966	98,67
		1,0	0,3	Mittelwert	100	-84,21	76,41	0,0197	0	0	99,30	0,3134	0,1772	0,0762	98,91
			0,6	Mittelwert	100	-29,17	24,87	0,0285	0	0	99,29	0,6293	0,0568	0,0556	99,20
			0,9	M673	100	-59,59	58,68	0,0024	0	0	98,14	0,9565	-0,0495	0,0604	99,84
50	10	0,3	0,3	Mittelwert	100	-662,37	668,18	0,0015	0	0	98,21	0,6989	1,4952	0,0104	99,97
			0,6	Mittelwert	100	-663,20	664,21	0,0010	0	0	89,06	-0,6943	1,1074	-0,1662	97,61
		0,9	0,9	Mittelwert	100	46,18	-44,65	-0,0038	0	0	62,63	-147,117	121,8119	-61,2672	76,29
			0,9	Mittelwert	100	46,18	-44,65	-0,0038	0	0	62,63	-147,117	121,8119	-61,2672	76,29

Tabelle G11: Approximation des axialen Dehnungsverlaufes ab dem 100. LW – Triax (OPA 0/8) – 30 und 50 °C

T [°C]	f [Hz]	Spannung		Probe- körper	max. LW	Gleichung 4-18					Gleichung 4-19			
		σ_{ax} [MPa]	σ_{rad} [MPa]			ε_0	a	k	b	c	R ²	A1	A2	R ²
30	10	1,0	0,15	Mittelwert	149,851	-755,83	765,39	0,0041	0	0	97,63	-52,3035	43,8261	92,74
			0,25	OPA431	149,851	-689,72	702,705	0,00397	0	0	97,25	-111,19	53,62	98,88
			0,3	Mittelwert	149,851	-749,32	761,18	0,0020	0	0	98,32	-4,7076	7,6323	99,94
			0,45	Mittelwert	149,851	-754,06	756,91	0,0021	0	0	97,51	-2,1406	2,1938	99,79
			0,6	OPA651	149,851	-752,17	752,14	0,0010	0	0	98,60	0,6551	0,3808	99,98
			0,15	Mittelwert	149,851	-864,75	872,48	0,0051	0	0	99,24	-222,304	131,0579	91,19
30	5	1,0	0,3	Mittelwert	149,851	-857,03	867,69	0,0018	0	0	97,99	-10,8621	6,9860	99,97
			0,45	Mittelwert	149,851	-861,13	864,08	0,0022	0	0	98,61	-4,9027	2,7798	99,95
			0,15	OPA783	13,201	-871,40	880,83	0,0061	0	0	99,07	-1068,853	329,837	98,21
			0,3	OPA762	116,951	-855,43	859,86	0,0016	0	0	96,47	-4,4940	2,2850	99,61
			0,45	Mittelwert	106,951	-858,89	867,50	0,0030	0	0	98,06	-40,1336	14,6864	99,29
			0,15	Mittelwert	149,851	-748,93	770,87	0,0019	0	0	98,79	-1,9049	29,7818	99,84
50	10	1,0	0,3	Mittelwert	149,851	-749,93	760,22	0,0009	0	0	98,97	4,5580	1,3967	99,71
			0,45	Mittelwert	149,851	-753,65	755,36	0,0008	0	0	98,60	1,1042	0,3409	99,66
			0,6	OPA673	113,701	-754,43	753,82	0,0004	0	0	96,97	0,6689	0,2867	99,81
			0,15	Mittelwert	149,851	-768,29	779,94	0,0026	0	0	99,51	-7,7650	8,6400	99,85
			0,3	Mittelwert	149,851	-764,73	770,91	0,0009	0	0	98,98	1,7874	0,7360	99,85
			0,45	Mittelwert	149,851	-767,01	768,72	0,0010	0	0	99,32	1,0305	0,3225	99,77
50	5	1,0	0,6	Mittelwert	149,851	-767,42	767,28	0,0005	0	0	98,48	0,7219	0,2208	99,68
			0,15	Mittelwert	116,851	-776,32	785,47	0,0028	0	0	99,82	-8,4453	6,6203	99,96
			0,3	Mittelwert	116,851	-772,43	777,56	0,0012	0	0	99,49	1,9999	0,4911	99,61
			0,45	OPA653	116,851	-773,07	776,90	0,0011	0	0	99,42	1,0869	0,5290	99,91
			0,6	Mittelwert	116,851	-774,52	776,66	0,0005	0	0	99,10	1,1269	0,2340	99,82

Tabelle G12: Approximation des radialen Dehnungsverlaufes – Triax (OPA 0/8) – 30 und 50 °C

T [°C]	f [Hz]	Spannung		Probe- körper	ab dem LWI	Gleichung 4-18					Gleichung 4-19			
		σ_{ax} [MPa]	σ_{rad} [MPa]			ε_0	a	k	b	c	R ²	A1	A2	R ²
30	10	1,0	0,15	Mittelwert	100	-752,46	755,98	0,0024	0	0	97,66	-3,6296	3,0575	99,78
			0,25	OPA431	100	-674,21	682,24	0,0013	0	0	92,26	-3,644	3,684	99,42
			0,3	Mittelwert	100	-747,33	750,23	0,0003	0	0	86,66	0,3454	1,3201	96,11
			0,45	Mittelwert	100	-749,37	748,99	0,0001	0	0	76,24	0,0354	1,8631	94,45
			0,6	OPA651	100	-749,30	745,91	-0,0003	0	0	99,67	0,5385	-0,0056	99,69
			0,15	Mittelwert	100	-861,15	861,57	0,0035	0	0	99,46	-17,4757	7,1087	99,37
30	5	1,0	0,3	Mittelwert	100	-854,08	857,98	0,0004	0	0	96,85	1,0658	0,6177	99,47
			0,45	Mittelwert	100	-857,30	856,40	0,0007	0	0	99,60	0,7930	0,1520	99,89
			0,15	OPA783	100	-872,76	874,79	0,0039	0	0	99,44	-24,6297	9,8375	99,62
			0,3	OPA762	100	-853,28	853,67	0,0005	0	0	91,20	-1,3420	1,2254	98,25
			0,45	Mittelwert	100	-854,00	857,24	0,0010	0	0	97,26	-0,6018	0,9555	99,92
			0,15	Mittelwert	100	-746,25	760,54	0,0002	0	0	84,47	-12,3303	33,6467	94,99
50	10	1,0	0,3	Mittelwert	100	-748,65	750,74	-0,0004	0	0	99,83	1,2345	-0,0369	99,89

Tabelle G12 (fortgesetzt)

T [°C]	f [Hz]	Spannung		Probe- körper	ab dem Last- wechsel	Gleichung 4-18					Gleichung 4-19			
		σ_{ax} [MPa]	σ_{ax} [MPa]			ϵ_0	a	k	b	c	R ²	A1	A2	R ²
50	10	1,0	0,45	Mittelwert	100	-752,22	746,84	-0,0005	0	0	99,92	0,3670	-0,0102	99,93
			0,6	OPA673	100	-752,85	744,30	-0,0010	0	0	99,82	0,2049	-0,0081	99,85
			0,15	Mittelwert	100	-766,32	769,11	0,0010	0	0	97,48	2,1707	0,0870	97,76
			0,3	Mittelwert	100	-764,65	757,09	-0,0004	0	0	96,08	0,6056	0,0799	99,50
	5	1,0	0,45	Mittelwert	100	-765,15	760,72	-0,0003	0	0	92,80	2,5352	1,0441	99,01
			0,6	Mittelwert	100	-765,57	757,65	-0,0009	0	0	99,89	0,2540	-0,0089	99,89
			0,15	Mittelwert	100	-773,77	774,53	0,0011	0	0	97,49	1,9897	-0,0530	99,45
			0,3	Mittelwert	100	-774,34	769,30	0,000496	0	0	98,14	0,4313	0,0439	97,57
	3,33	1,0	0,45	M653	100	-770,85	768,75	-0,0002	0	0	98,74	0,8021	0,0479	99,76
			0,6	Mittelwert	100	-773,65	769,07	-0,0005	0	0	98,78	0,6914	0,0238	99,95

Tabelle G13: Approximation des axialen Dehnungsverlaufes ab dem 100. LW – Triax (ABi 0/16S) – 30 und 50 °C

T [°C]	f [Hz]	Spannung		Probe- körper	max. LW	Gleichung 4-18					Gleichung 4-19			
		σ_{ax} [MPa]	σ_{ax} [MPa]			ϵ_0	a	k	b	c	R ²	A1	A2	R ²
30	10	1,0	0,01	BM2043	149.851	-688,70	669,01	0,0071	16	0	99,90	-	-	-
			0,15	Mittelwert	149.851	-681,48	670,41	0,0040	0	0	99,77	-0,5826	0,6216	99,19
			0,3	Mittelwert	149.851	-676,15	673,88	0,0021	0	0	99,01	0,1544	0,5452	99,72
			0,6	Mittelwert	149.851	-674,98	673,99	0,0013	0	0	98,21	0,4640	0,3883	99,75
	5	1,0	0,9	BM1241	149.851	-674,22	674,75	0,0013	0	0	97,76	0,4813	0,5297	99,76
			0,3	Mittelwert	149.851	-677,68	675,86	0,0027	0	0	98,60	-1,7035	1,1078	99,63
			0,6	Mittelwert	149.851	-674,25	674,67	0,0010	0	0	97,49	0,2458	0,4641	99,93
			0,9	BM1283	149.851	-673,87	675,07	0,0011	0	0	97,51	0,0729	0,6010	99,96
	3,33	1,0	0,3	Mittelwert	116.851	-676,90	674,36	0,0024	0	0	98,94	-1,0034	0,6981	99,72
			0,6	Mittelwert	116.851	-674,10	674,70	0,0012	0	0	99,05	0,4240	0,3764	99,98
50	10	1,0	0,9	BM1271	116.851	-673,46	675,34	0,0013	0	0	97,84	-0,1753	0,6753	99,88
			0,02	BM732	15.451	3,44	3,12	0,2800	1,706	9,8*10 ⁻⁵	99,91	-	-	-
			0,15	Mittelwert	149.851	-81,48	79,86	0,0310	0	0	99,92	-4,1121	3,0809	99,81
			0,3	Mittelwert	149.851	-277,19	279,85	0,0049	0	0	99,73	1,2207	0,8830	99,98
	5	1,0	0,6	Mittelwert	149.851	-276,94	279,08	0,0026	0	0	99,02	1,1356	0,4330	99,96
			0,9	Mittelwert	149.851	-276,51	279,21	0,0019	0	0	98,95	1,3545	0,3535	99,93
			0,3	Mittelwert	149.851	-279,37	280,66	0,0048	0	0	99,93	1,1272	0,5038	99,98
			0,6	Mittelwert	149.851	-277,11	281,15	0,0029	0	0	99,43	1,3372	0,5466	99,95
	3,33	1,0	0,9	BM733	149.851	-276,73	281,51	0,0023	0	0	99,13	1,5616	0,5266	99,84
			0,3	Mittelwert	116.851	-675,27	678,68	0,0024	0	0	99,82	-0,3366	1,2510	100,00
99,99	3,33	1,0	0,6	Mittelwert	116.851	-672,87	679,50	0,0013	0	0	97,93	-0,4769	1,4738	99,99
			0,9	Mittelwert	116.851	-673,89	678,16	0,0008	0	0	98,16	0,7451	0,6601	99,94

Tabelle G14: Approximation des radialen Dehnungsverlaufs – Triax (ABI 0/16S) – 30 und 50 °C

T [°C]	f [Hz]	Spannung		Probe- körper	ab dem Last- wechsel	Gleichung 4-18					Gleichung 4-19			
		σ_{ax} [MPa]	σ_{rad} [MPa]			ϵ_0	a	k	b	c	R ²	A1	A2	R ²
30	10	1,0	0,01	BM2043	100	-4,79	0,42	0,3728	$9,0 \cdot 10^{-2}$	$2,0 \cdot 10^{-5}$	99,66	-	-	-
			0,15	Mittelwert	100	-9,17	5,71	0,1094	0	0	99,91	0,6139	0,0868	99,77
			0,3	Mittelwert	100	-672,12	671,18	0,0005	0	0	93,97	0,4930	0,3619	98,61
			0,6	Mittelwert	4.000	-682,59	684,23	-0,0002	0	0	93,97	1,4898	0,1102	89,31
			0,9	BM1241	2.000	-670,08	671,96	-0,0004	0	0	98,15	1,5386	0,0701	95,68
	5	1,0	0,3	Mittelwert	100	-673,63	671,87	0,0011	0	0	96,20	0,0124	0,3864	99,31
			0,6	Mittelwert	5.000	-671,39	673,67	-0,0003	0	0	99,60	1,2247	0,0588	99,86
			0,9	BM1283	600	-670,14	672,20	-0,0004	0	0	99,33	1,1141	-0,0715	99,46
			0,3	Mittelwert	100	-673,03	671,78	0,0009	0	0	96,18	-0,0259	0,3902	99,41
			0,6	Mittelwert	500	-670,14	671,95	-0,0004	0	0	99,46	1,1606	-0,0533	99,89
50	10	1,0	0,9	BM1271	500	-668,94	671,36	-0,0005	0	0	97,91	1,1501	-0,0651	99,06
			0,02	BM732	100	9,24	0,01	0,8142	$-1,1 \cdot 10^{-3}$	$-2 \cdot 10^{-3}$	99,94	-	-	-
			0,15	Mittelwert	100	-16,51	16,05	0,0657	0	0	99,89	0,9424	0,3510	99,98
			0,3	Mittelwert	100	-265,01	266,79	0,0011	0	0	97,37	1,0831	0,3467	99,37
			0,6	Mittelwert	500	-267,92	268,83	-0,0008	0	0	99,00	0,9924	-0,0551	99,84
	5	1,0	0,9	Mittelwert	100	-269,74	271,17	-0,0013	0	0	98,15	0,9899	-0,0617	99,80
			0,3	Mittelwert	100	-272,81	273,36	0,0016	0	0	99,71	1,2168	0,0529	99,72
			0,6	Mittelwert	100	-265,04	267,06	-0,0006	0	0	93,24	1,2380	-0,0743	96,64
			0,9	BM733	100	-263,82	266,16	-0,0013	0	0	99,28	1,2124	-0,0605	99,97
			0,3	Mittelwert	100	-671,05	673,33	0,0006	0	0	98,88	1,0409	0,2891	99,87
30	3,33	1,0	0,6	Mittelwert	500	-670,17	673,61	-0,0002	0	0	90,47	1,5433	-0,1188	97,65
			0,9	Mittelwert	100	-670,83	672,94	-0,0003	0	0	88,43	1,1933	-0,0959	99,28

Tabelle G15: Approximation des axialen Dehnungsverlaufs ab dem 100. LW – Triax (ATS 0/32 CS) – 30 und 50 °C

T [°C]	f [Hz]	Spannung		Probe körper	max. LW	Gleichung 4-18					Gleichung 4-19			
		σ_{ax} [MPa]	σ_{rad} [MPa]			ϵ_0	a	k	b	c	R ²	A1	A2	R ²
30	10	1,0	0,01	T1092	63.751	10,27	$2,12 \cdot 10^{-3}$	0,90	1,52	$2,14 \cdot 10^{-5}$	98,54	-	-	-
			0,15	Mittelwert	149.851	-335,93	326,85	0,0085	0	0	99,91	-0,9931	0,9276	99,45
			0,3	Mittelwert	149.851	-331,69	328,13	0,0047	0	0	99,43	0,2184	0,4703	99,81
			0,45	T1781	47.851	-455,05	450,28	0,0043	0	0	99,16	-0,2543	0,6685	99,65
			0,6	Mittelwert	149.851	-329,02	328,09	0,0023	0	0	98,73	0,6369	0,2961	99,90
	5	1,0	0,15	Mittelwert	149.851	-12,21	10,37	0,1204	0	0	99,97	-1,9553	1,0594	99,51
			0,3	Mittelwert	149.851	-87,68	84,94	0,0208	0	0	99,10	-1,4549	0,9424	99,75
			0,45	T1491	149.851	-332,97	333,46	0,0042	0	0	98,51	-0,9094	0,9591	99,94
			0,6	Mittelwert	149.851	-152,20	150,34	0,0065	0	0	99,87	0,6621	0,1995	99,98
			0,15	Mittelwert	116.851	-38,84	33,61	0,0705	0	0	99,99	-8,8725	2,9203	98,62
30	3,33	1,0	0,3	Mittelwert	116.851	-686,61	682,46	0,0040	0	0	98,88	-8,2564	2,7890	99,19
			0,45	T1493	116.851	-679,87	679,03	0,0016	0	0	99,74	0,4695	0,3181	99,97
			0,6	Mittelwert	116.851	-679,38	679,03	0,0011	0	0	98,47	0,2106	0,3661	99,94

Tabelle G15 (fortgesetzt)

T [°C]	f [Hz]	Spannung		Probe körper	max. LW	Gleichung 4-18						Gleichung 4-19			
		σ_{\max} [MPa]	σ_{grad} [MPa]			ε_0	a	k	b	c	R ²	A1	A2	A2	R ²
50	10	1,0	0,15	Mittelwert	149,851	-7,51	10,78	0,1022	0	0	99,79	0,3036	1,2087	0,0942	100,00
			0,3	Mittelwert	149,851	-8,22	10,00	0,0947	0	0	99,92	2,0094	0,2891	0,0942	99,39
			0,45	T1283	149,851	-2,69	5,19	0,1274	0	0	99,91	1,3599	0,3347	0,0889	99,99
	5	1,0	0,6	Mittelwert	149,851	-7,48	7,05	0,0685	0	0	99,83	1,0973	0,0485	0,0625	99,87
			0,15	Mittelwert	149,851	-250,65	239,44	0,0153	0	0	99,98	-7,8805	2,9321	0,0943	98,45
			0,3	Mittelwert	149,851	-11,26	12,77	0,1007	0	0	99,92	-2,1480	1,4786	0,0903	99,80
30	10	1,0	0,45	T1371	149,851	-146,10	144,14	0,0110	0	0	99,97	0,2703	0,4992	0,0693	99,95
			0,6	T1281	149,851	-32,44	31,95	0,0274	0	0	99,97	1,0310	0,1547	0,0592	99,98
			0,15	Mittelwert	116,851	-7,88	5,92	0,1831	0	0	99,88	-7,6420	2,4073	0,0957	97,23
	3,33	1,0	0,3	Mittelwert	116,851	-5,65	6,42	0,1348	0	0	99,99	-0,4038	0,5845	0,0872	99,68
			0,45	T1232	116,851	-73,43	73,50	0,0126	0	0	99,71	0,9590	0,1999	0,0505	99,78
			0,6	T1222	116,851	-0,02	0,09	0,3416	0	0	99,79	0,9453	-0,0530	0,0788	99,55

Tabelle G16: Approximation des radialen Dehnungsverlaufs – Triax (ATS 0/32 CS) – 30 und 50 °C

T [°C]	f [Hz]	Spannung		Probe körper	ab dem Last- wechsel	Gleichung 4-18						Gleichung 4-19			
		σ_{\max} [MPa]	σ_{grad} [MPa]			ε_0	a	k	b	c	R ²	A1	A2	A2	R ²
30	10	1,0	0,01	T1092	100	2,03	$7,1 \cdot 10^{-5}$	1,21	-8,41	$-4,1 \cdot 10^{-4}$	99,89	-	-	-	-
			0,15	Mittelwert	100	-333,14	326,75	0,0046	0	0	99,91	0,4290	0,1950	0,0689	99,80
			0,3	Mittelwert	100	-328,36	327,32	0,0010	0	0	95,49	0,5393	0,3214	-0,1340	99,36
	5	1,0	0,45	T1781	7,000	-450,55	453,13	-0,0004	0	0	95,46	1,9614	0,2717	-0,3236	93,68
			0,6	Mittelwert	100	-325,15	326,92	-0,0017	0	0	99,74	1,0502	-0,0435	-0,0345	99,79
			0,15	Mittelwert	100	-4,93	3,26	0,1595	0	0	99,99	0,5300	0,1288	0,0862	99,93
50	10	1,0	0,3	Mittelwert	100	-230,85	229,20	0,0029	0	0	97,19	0,2065	0,3188	-0,0292	99,54
			0,45	T1491	100	-312,21	315,81	-0,0023	0	0	98,13	1,1656	-0,0743	0,0054	99,20
			0,6	Mittelwert	100	-595,76	597,87	-0,0015	0	0	99,55	0,9299	-0,0569	-0,0401	99,94
	3,33	1,0	0,15	Mittelwert	100	-11,81	8,85	0,1014	0	0	100,00	0,2314	0,2130	0,0810	99,93
			0,3	Mittelwert	100	-679,81	679,30	0,0008	0	0	91,59	-1,2940	0,9610	-0,2625	99,18
			0,45	T1493	400	-675,48	675,57	-0,0001	0	0	92,10	1,1392	0,3790	-0,4170	93,84
50	10	1,0	0,6	Mittelwert	100	-675,20	676,29	-0,0005	0	0	99,36	1,0184	-0,0468	0,0169	99,90
			0,15	Mittelwert	100	-1,89	3,46	0,1206	0	0	99,55	1,3454	0,0873	0,0742	99,67
			0,3	Mittelwert	100	0,16	0,11	0,2771	0	0	99,63	1,0420	-0,0652	0,0787	99,79
	5	1,0	0,45	T1283	100	-1,61	0,83	0,0867	0	0	99,64	0,9373	-0,0715	0,0828	99,10
			0,6	Mittelwert	100	-52,76	51,57	-0,0076	0	0	99,92	0,7048	-0,0199	-0,0287	99,94
			0,15	Mittelwert	100	-41,98	35,74	0,0398	0	0	99,97	0,1519	0,2272	0,0779	99,83
50	10	1,0	0,3	Mittelwert	100	-0,20	0,50	0,2124	0	0	99,63	1,0430	-0,0391	0,0741	99,76
			0,45	T1371	2,000	-28,981	27,817	0,00175	0	0	89,83	0,8673	-0,0524	0,0623	90,00
			0,6	T1281	100	-26,86	26,56	-0,0196	0	0	99,76	0,8323	-0,0201	-0,0576	99,75
	3,33	1,0	0,15	Mittelwert	100	-2,28	1,45	0,2570	0	0	99,90	-0,8200	0,4099	0,0917	99,14
			0,3	Mittelwert	100	-1,58	0,67	0,2025	0	0	99,97	0,8334	-0,0214	0,0719	99,94
			0,45	T1232	100	-62,34	61,98	-0,0015	0	0	95,30	0,9399	0,0089	-0,0288	95,38
50	3,33	1,0	0,6	T1222	100	0,31	-0,22	0,1852	0	0	98,95	1,0218	-0,0587	0,0453	98,81

Tabelle H1: Reduktionsfaktor R

Reduktions- Faktor R [-]			Temperatur [°C]						
Bitumen	Penetration [1/10 mm]	Frequenz [Hz]	-20	-10	0	10	20	30	40
50/70	50	5	0,8875	0,7375	0,5313	0,3438	0,1688	0,0625	0,0250
		10	0,9063	0,7750	0,5688	0,3813	0,2000	0,0813	0,0313
		20	0,9188	0,8125	0,6125	0,4188	0,2438	0,1000	0,0375
	60	5	0,8690	0,7000	0,4875	0,3000	0,1250	0,0500	0,0188
		10	0,8875	0,7313	0,5310	0,3375	0,1563	0,0560	0,0200
		20	0,9060	0,7750	0,5750	0,3813	0,2000	0,0750	0,0313
	70	5	0,8500	0,6625	0,4625	0,2688	0,1063	0,0375	0,0156
		10	0,8750	0,7063	0,5000	0,3125	0,1313	0,0500	0,0188
		20	0,8938	0,7438	0,5375	0,3438	0,1688	0,0625	0,0250
PmB 45 A	20	5	0,9500	0,8813	0,7250	0,5375	0,3563	0,1875	0,0813
		10	0,9563	0,9000	0,7625	0,5750	0,4000	0,2313	0,0938
		20	0,9625	0,9125	0,8000	0,6188	0,4375	0,2688	0,1250
	40	5	0,9125	0,7813	0,5813	0,3875	0,2060	0,0810	0,0313
		10	0,9250	0,8125	0,6188	0,4250	0,2438	0,1000	0,0375
		20	0,9375	0,8438	0,6563	0,4688	0,2875	0,1313	0,0500
	60	5	0,8690	0,7000	0,4875	0,3000	0,1250	0,0500	0,0188
		10	0,8875	0,7313	0,5310	0,3375	0,1563	0,0560	0,0200
		20	0,9060	0,7750	0,5750	0,3813	0,2000	0,0750	0,0313
PmB H	40	5	0,9125	0,7813	0,5813	0,3875	0,2060	0,0810	0,0313
		10	0,9250	0,8125	0,6188	0,4250	0,2438	0,1000	0,0375
		20	0,9375	0,8438	0,6563	0,4688	0,2875	0,1313	0,0500
	70	5	0,8500	0,6625	0,4625	0,2688	0,1063	0,0375	0,0156
		10	0,8750	0,7063	0,5000	0,3125	0,1313	0,0500	0,0188
		20	0,8938	0,7438	0,5375	0,3438	0,1688	0,0625	0,0250
	100	5	0,8000	0,5813	0,3750	0,1875	0,0625	0,0250	0,0125
		10	0,8313	0,6250	0,4188	0,2313	0,0813	0,0313	0,0125
		20	0,8563	0,6688	0,4625	0,2688	0,1063	0,0375	0,0188

Tabelle H2: Kenngrößen V_a , V_b , V_g , U , E_∞

	V_a	V_b	V_g	U	E_∞
	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[Vol.-%]
AB 0/11S	3,0	13,9	83,1	5,98	32224,67
SMA 0/11S (SMA I)	3,7	14,7	81,6	5,55	29697,31
SMA 0/11S (SMA II)	4,0	13,7	82,3	6,01	30477,33
OPA 0/8	25,3	10,6	64,1	6,05	8819,83
ABi 0/16S	3,9	14,1	82,0	5,82	30113,87
ATS 0/32 CS	5,1	14,1	80,8	5,73	27855,19

Tabelle H3: Absoluter Elastizitätsmodul berechnet nach Francken und Verstraeten

Absoluter E-Modul [MPa] (Francken und Verstraeten)			Temperatur [°C]						
Asphalt	Penetration [1/10 mm]	Freq. [Hz]	-20	-10	0	10	20	30	40
AB 0/11S mit 50/70	50	5	28599,39	23765,69	17119,36	11077,23	5437,91	2014,04	805,62
		10	29203,61	24974,12	18327,78	12285,66	6444,93	2618,25	1007,02
		20	29606,42	26182,54	19737,61	13494,08	7854,76	3222,47	1208,43
	60	5	28003,24	22557,27	15709,53	9667,40	4028,08	1611,23	604,21
		10	28599,39	23565,90	17111,30	10875,83	5036,72	1804,58	644,49
		20	29195,55	24974,12	18529,18	12285,66	6444,93	2416,85	1007,02
	70	5	27390,97	21348,84	14903,91	8660,38	3423,87	1208,43	503,51
		10	28196,59	22758,67	16112,33	10070,21	4229,49	1611,23	604,21
		20	28800,80	23967,10	17320,76	11077,23	5437,91	2014,04	805,62
SMA 0/11S (SMA I) mit PmB 45 A	20	5	28212,45	26170,76	21530,55	15962,31	10579,67	5568,25	2412,91
		10	28398,05	26727,58	22644,20	17075,95	11878,92	6867,50	2784,12
		20	28583,66	27098,80	23757,85	18375,21	12992,57	7981,15	3712,16
	40	5	27098,80	23201,03	17261,56	11507,71	6117,65	2405,48	928,04
		10	27470,01	24129,07	18375,21	12621,36	7238,72	2969,73	1113,65
		20	27841,23	25057,11	19488,86	13920,62	8537,98	3897,77	1484,87
	60	5	25806,96	20788,12	14477,44	8909,19	3712,16	1484,87	556,82
		10	26356,36	21717,64	15769,27	10022,84	4641,69	1663,05	593,95
		20	26905,76	23015,42	17075,95	11322,10	5939,46	2227,30	928,04
SMA 0/11S (SMA II) mit PmB 45 A	20	5	28953,46	26858,14	22096,06	16381,56	10857,55	5714,50	2476,28
		10	29143,94	27429,59	23238,96	17524,46	12190,93	7047,88	2857,25
		20	29334,43	27810,56	24381,86	18857,84	13333,83	8190,78	3809,67
	40	5	27810,56	23810,41	17714,95	11809,96	6278,33	2468,66	952,42
		10	28191,53	24762,83	18857,84	12952,86	7428,85	3047,73	1142,90
		20	28572,49	25715,24	20000,74	14286,25	8762,23	4000,15	1523,87
	60	5	26484,80	21334,13	14857,70	9143,20	3809,67	1523,87	571,45
		10	27048,63	22288,07	16183,46	10286,10	4763,61	1706,73	609,55
		20	27612,46	23619,93	17524,46	11619,48	6095,47	2285,80	952,42
OPA 0/8 mit PmB H	40	5	8048,10	6890,49	5126,53	3417,69	1816,89	714,41	275,62
		10	8158,35	7166,11	5457,27	3748,43	2149,83	881,98	330,74
		20	8268,59	7441,73	5788,02	4134,30	2535,70	1157,60	440,99
	70	5	7496,86	5843,14	4079,17	2370,33	937,11	330,74	137,81
		10	7717,35	6229,01	4409,92	2756,20	1157,60	440,99	165,37
		20	7882,73	6559,75	4740,66	3031,82	1488,35	551,24	220,50
	100	5	7055,87	5126,53	3307,44	1653,72	551,24	220,50	110,25
		10	7331,49	5512,40	3693,31	2039,59	716,61	275,62	110,25
		20	7551,98	5898,26	4079,17	2370,33	937,11	330,74	165,37
ABi 0/16S mit PmB 45 A	20	5	28608,18	26537,85	21832,56	16186,21	10728,07	5646,35	2446,75
		10	28796,39	27102,49	22961,83	17315,48	12045,55	6963,83	2823,18
		20	28984,60	27478,91	24091,10	18632,96	13174,82	8093,10	3764,23
	40	5	27478,91	23526,46	17503,69	11669,13	6203,46	2439,22	941,06
		10	27855,33	24467,52	18632,96	12798,40	7340,26	3011,39	1129,27
		20	28231,76	25408,58	19762,23	14115,88	8657,74	3952,45	1505,69
	60	5	26168,96	21079,71	14680,51	9034,16	3764,23	1505,69	564,64
		10	26726,06	22022,28	15990,47	10163,43	4706,80	1686,38	602,28
		20	27283,17	23338,25	17315,48	11480,91	6022,77	2258,54	941,06
ATS 0/32 CS mit 50/70	50	5	24721,48	20543,20	14798,07	9575,22	4700,56	1740,95	696,38
		10	25243,77	21587,77	15842,64	10619,79	5571,04	2263,23	870,47
		20	25591,96	22632,34	17061,31	11664,36	6789,70	2785,52	1044,57
	60	5	24206,16	19498,63	13579,41	8356,56	3481,90	1392,76	522,28
		10	24721,48	20370,50	14791,11	9401,13	4353,77	1559,89	557,10
		20	25236,80	21587,77	16016,74	10619,79	5571,04	2089,14	870,47
	70	5	23676,91	18454,07	12883,03	7486,08	2959,61	1044,57	435,24
		10	24373,29	19672,73	13927,60	8704,75	3655,99	1392,76	522,28
		20	24895,58	20717,30	14972,17	9575,22	4700,56	1740,95	696,38